



Universidad  
Carlos III de Madrid

Departamento de Tecnología Electrónica

## PROYECTO FIN DE CARRERA

***Desarrollo de un sensor de temperatura  
remoto basado en la radiación infrarroja.***

Autor: Abraham de los Ángeles Díaz García

Tutora: Marta Ruiz Llata

Leganés, Octubre de 2012



Título: Desarrollo de un sensor de temperatura remoto basado en la radiación infrarroja.  
Autor: Abraham de los Ángeles Díaz García  
Directora: Marta Ruiz Llata

## EL TRIBUNAL

Presidente: José María Armingol

Vocal: José Ramón López Fernández

Secretario: Pedro Martín Mateos

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 30 de Octubre de 2012 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



# Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer este proyecto a mi abuelo, que aunque no esté presente en este momento de mi vida, sé que cuento con su apoyo y seguro que se encuentra muy orgulloso de que haya alcanzado esta etapa de mi vida.

A mis padres y hermana, porque sin ellos no estaría aquí, por su apoyo prestado para seguir siempre adelante y su confianza depositada, alcanzando aquellas metas que nunca antes había imaginado.

Dar gracias a Laura, por hacerme tan feliz y por apoyarme en todo momento a lo largo de este año, y hacerme darme cuenta de que todo aquello que te propongas en la vida puedes hacerlo si confías en ti mismo.

A todos mis amigos, a los de siempre y a los de la universidad que a lo largo de estos años me han hecho pasar muy buenos momentos, necesarios en el día a día y que nunca se olvidarán.

Como no, agradecer a mi tutora de proyecto, Marta Ruiz, por la oportunidad que me ha brindado de realizar con ella este segundo PFC y por toda la ayuda prestada en todo momento, además de los conocimientos adquiridos durante estos años

Gracias a todos.



# Resumen

Este proyecto fin de carrera se centra en el estudio y diseño de un sensor de temperatura remoto. El objetivo principal del proyecto es desarrollar un dispositivo capaz de obtener la temperatura de un objeto situado a una cierta distancia, conocida su emisividad y la radiación infrarroja emitida por éste. Además, se plantea dentro de este proyecto el estudio de los principios básicos de termometría infrarroja y la clasificación de los distintos tipos de termopilas en el mercado atendiendo a sus principales características, con el fin de seleccionar la más adecuada para el desarrollo de nuestro sensor.

Las aportaciones principales del proyecto son: el estudio de los fundamentos físicos para la cuantificación de la radiación infrarroja emitida por los cuerpos según su temperatura, el estudio de mercado de este tipo de sensores y la clasificación de los distintos tipos de proveedores de termopilas atendiendo a las principales características de las mismas, y la implementación de un prototipo de termómetro infrarrojo basado en una termopila, con todo el diseño y desarrollo electrónico, óptico y mecánico que conlleva, así como la calibración y realización de las distintas pruebas que permitan la verificación de su correcto funcionamiento.

**Palabras clave:** Sensor, termómetro, radiación infrarroja, termopila, termistor, temperatura ambiente, temperatura del objeto, emisividad, campo de visión.





# Índice general

<b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Medios empleados.....	2
1.4 Estructura de la memoria .....	3
<b>2. PRINCIPIOS DE LA RADIACIÓN INFRARROJA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Introducción .....	6
2.2 Fundamentos físicos .....	7
2.3 Tipos y funcionamiento de los termómetros infrarrojos .....	10
2.4 Construcción y funcionamiento de una termopila .....	11
2.5 Conclusiones .....	13
<b>3. CLASIFICACIÓN Y MERCADO DE LAS TERMOPILAS.....</b>	<b>15</b>
3.1 Clasificación.....	16
3.2 Conclusiones .....	22
<b>4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN TERMÓMETRO INFRARROJO .....</b>	<b>23</b>
4.1 Termopila .....	24
4.2 Circuito de adquisición de temperatura.....	24
4.2.1 Circuito termistor .....	24
4.2.2 Circuito termopila .....	26
4.2.3 Circuito de alimentación .....	28
4.3 Diseño de placa PCB.....	29
4.4 Calibración del sistema .....	31
4.4.1 Equipos auxiliares empleados .....	31
4.4.2 Ajuste de termistor .....	34
4.4.3 Calibración óptica .....	36
4.4.4 Ajuste de termopila .....	39
4.5 Conclusiones .....	41

<b>5. MEDIDAS DE FUNCIONAMIENTO .....</b>	<b>43</b>
5.1 Software de control .....	44
5.2 Descripción del procedimiento seguido en los experimentos .....	47
5.3 Verificación del sistema.....	49
5.4 Conclusiones .....	53
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>55</b>
<b>7. GESTIÓN Y PRESUPUESTO DEL PROYECTO .....</b>	<b>57</b>
7.1 Gestión .....	57
7.2 Presupuesto .....	58
<b>8. REFERENCIAS.....</b>	<b>61</b>
<b>9. ANEXO 1 .....</b>	<b>65</b>
Documentación de placa Temperatura-IR .....	65
<b>10. ANEXO 2 .....</b>	<b>69</b>
Puesta en marcha de termopila con salida digital .....	69

# Índice de figuras

Figura 1. Espectro electromagnético. ....	6
Figura 2. Absorción, reflexión y transmisión de la energía incidente. ....	7
Figura 3. Espectro de radiación térmica de un cuerpo negro en función de $\lambda$ [OPT]. ....	8
Figura 4. Esquema básico de una termopila. ....	11
Figura 5. Composición de la termopila. ....	11
Figura 6. Flujograma de lectura $T_{\text{objeto}}$ . ....	13
Figura 7. Termopila HMSM21L3.0F5.5 [HETE]. ....	24
Figura 8. Circuito acondicionador del termistor. ....	25
Figura 9. Comportamiento del termistor frente a la temperatura ambiente. ....	25
Figura 10. Respuesta del divisor de tensión del termistor para diferentes valores de temperatura. ....	26
Figura 11. Circuito acondicionador de la termopila. ....	27
Figura 12. Circuito de alimentación. ....	28
Figura 13. Soporte y fijador del dispositivo. ....	29
Figura 14. Placa PCB del sensor. ....	30
Figura 15. Circuito acondicionador de la termopila. ....	31
Figura 16. Especificaciones ópticas D:S = 15:1. ....	31
Figura 17. Cámara climática CCK -40/180. ....	32
Figura 18. Muestra de asfalto de carretera. ....	33
Figura 19. Tarjeta de adquisición de datos <i>miniLAB 1008</i> . ....	34
Figura 20. Campo de visión de la termopila. ....	36
Figura 21. Esquema de lente plano-convexa. ....	37
Figura 22. Cálculo de la distancia de adaptación de la lente. ....	37
Figura 23. Incorporación de una lente de 25.4mm de diámetro y distancia focal. ....	38
Figura 24. Relación óptica D:S del sensor. ....	38
Figura 25. Sensor de Temperatura-IR. ....	41
Figura 26. Panel frontal del programa de control. ....	44
Figura 27. Diagrama de bloques del programa de control con uso de fórmulas. ....	45
Figura 28. Variación de $V_{tp}$ en función de $T_{\text{objeto}}$ . ....	46

Figura 29. Diagrama de bloques del programa de control con uso de <i>lookup tables</i> . ....	47
Figura 30. Disposición de los elementos durante el desarrollo las medidas. ....	48
Figura 31. Fuentes de radiación empleadas: asfalto, aluminio y madera. ....	49
Figura 32. Temperatura-IR vs CS LT para asfalto. ....	50
Figura 33. Temperatura-IR vs CS LT para aluminio. ....	51
Figura 34. Temperatura-IR vs CS LT para madera. ....	52
Figura 35. Diagrama de Gantt. ....	58
Figura 36. Circuito de comunicación y alimentación de la termopila digital. ....	70

# Índice de tablas

Tabla 1. Valores de emisividad en función de la temperatura de medida [OPT]. .....	8
Tabla 2. Distribuidores de termopilas en el mercado. ....	21
Tabla 4. Programa de la cámara climática para ajuste de termistor. ....	32
Tabla 4. Resistencia del termistor en función de la temperatura. ....	35
Tabla 5. Comparativa de parámetros fabricante vs medidos .....	35
Tabla 6. Temperatura ambiente en función de distintos parámetros. ....	36
Tabla 7. $V_{tp}$ en función de la temperatura del objeto. ....	40
Tabla 8. $T_{Obj}$ en función de la sensibilidad $K$ para $T_{Amb}$ constante de 25.5°C. ....	40
Tabla 9. <i>Lookup tables</i> de termistor y termopila. ....	45
Tabla 10. Valores de Temperatura-IR vs CS LT para asfalto. ....	50
Tabla 11. Valores de Temperatura-IR vs CS LT para aluminio. ....	52
Tabla 12. Valores de Temperatura-IR vs CS LT para madera. ....	53
Tabla 13. Hoja de características técnicas del sensor Temperatura-IR diseñado. ....	54
Tabla 14. Descripción y periodo de las tareas realizadas en el proyecto. ....	58



# Capítulo 1

## Introducción y objetivos

### 1.1 Introducción

Actualmente, los sistemas de medición de temperatura usando termómetros infrarrojos cada vez son más utilizados, ya que permiten la medición de temperatura de un objeto situado a una cierta distancia sin causar contacto con el mismo. Son utilizados en aquellas operaciones donde no es posible el contacto entre el dispositivo de medida y objeto, tales como la medición de un metal en una fundición, alimentos, comprobación de equipos mecánicos (motores, maquinaria...) o eléctricos (circuitos eléctricos, placas, luces...), o incluso para determinar la temperatura a la que se encuentra el asfalto de una carretera con el fin de alertar a bajas temperaturas, aumentando la seguridad.

Estos sensores miden la temperatura sin contacto, utilizando la propiedad que tienen todos los materiales de emitir ondas electromagnéticas en el rango del infrarrojo, estando esta radiación totalmente relacionada con la temperatura del objeto. Conociendo la cantidad de energía infrarroja emitida por el objeto y su emisividad, la temperatura del objeto puede ser determinada.

Este proyecto fin de carrera se ha realizado en el Grupo de Optoelectrónica y Tecnología Láser de la UC3M, donde existe una avanzada experiencia sobre dispositivos y sensores ópticos en la banda infrarroja. En este entorno el presente proyecto fin de carrera trata de estudiar la termometría infrarroja mediante el desarrollo de un sensor de estas características.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal del proyecto reside en el desarrollo de un termómetro capaz de medir la temperatura de los materiales de forma remota, dentro de un rango de temperaturas preestablecido, basándonos en la radiación que emiten los cuerpos en el infrarrojo próximo por encontrarse a una cierta temperatura. Para ello el presente proyecto fin de carrera propone los siguientes objetivos:

1. Manejar los conceptos que involucran la medición de temperatura sin contacto por infrarrojos.
2. Implementación de un prototipo de termómetro infrarrojo basado en una termopila con salida analógica, mediante el diseño y desarrollo electrónico, óptico, mecánico y la calibración que conlleva el mismo.
3. Puesta en marcha y verificación del funcionamiento del termómetro diseñado.

En el desarrollo del proyecto se han ido cumpliendo cada uno de los objetivos anteriores. Además se contempla en este proyecto la búsqueda de los diferentes proveedores de termopilas existentes actualmente en el mercado, clasificando los distintos tipos de termopilas atendiendo a sus principales características, con el objetivo de seleccionar aquella que mejor se adapte a nuestras condiciones de trabajo, para el diseño y desarrollo de nuestro termómetro infrarrojo. Estas actividades han sido realizadas previamente a este proyecto, en una beca de colaboración con el Departamento de Tecnología Electrónica, incluidas y necesarias en este trabajo al formar parte del desarrollo del termómetro infrarrojo a diseñar.

## 1.3 Medios empleados

El proyecto se ha llevado a cabo en los laboratorios del Grupo de Optoelectrónica y tecnología Láser. Los medios utilizados han sido la instrumentación básica de laboratorio (osciloscopio, polímetros, fuentes de alimentación, sistemas optomecánicos, etc).

Para el diseño de circuitos impresos se ha empleado el software de diseño de circuitos electrónicos *OrCAD*, a través de las herramientas *Capture Cis* y *Layout Plus*, mientras que para la construcción de los mismos se ha hecho uso de las facilidades del Departamento de Tecnología Electrónica y Oficina Técnica de la UC3M.

Finalmente, para las pruebas y mediciones realizadas en el laboratorio, se ha utilizado una tarjeta de adquisición de datos, modelo *miniLAB 1008*, un ordenador portátil para almacenar dichos datos y permitir el soporte al software *LabVIEW*, encargado del procesamiento de los mismos. Para el calentamiento o enfriamiento de los objetos utilizados en las mediciones se ha utilizado una cámara climática del fabricante *DYCOMETAL*, modelo CCK -40/180.



## 1.4 Estructura de la memoria

Para facilitar la lectura de la memoria, se incluye a continuación un breve resumen de cada capítulo:

- En este primer Capítulo se introduce una visión global de cómo se va a tratar y desarrollar el presente proyecto.
- En el Capítulo 2 se describen los conceptos y fundamentos físicos para la captación y cuantificación de la temperatura sin contacto por infrarrojos, así como la composición y funcionamiento de la termopila para la medición de dicha temperatura.
- En el Capítulo 3 se presenta una búsqueda de los diferentes tipos de proveedores de termopilas existentes actualmente en el mercado, clasificando los distintos tipos de termopilas, según sus características fundamentales, con el fin de seleccionar aquella que mejor se adapte a nuestras condiciones de servicio, para llevar a cabo el desarrollo de nuestro sensor.
- En el Capítulo 4 se detalla el diseño y desarrollo de los sistemas electrónicos, mecánicos y ópticos de un termómetro infrarrojo basado en la termopila seleccionada, así como la calibración del mismo.
- Una vez diseñado nuestro termómetro, en el Capítulo 5 se detalla el desarrollo de un software de control de todo el sistema, junto a la disposición de los elementos en el entorno de trabajo y verificación del correcto funcionamiento del dispositivo diseñado, corroborado por un segundo sensor tomado como referencia.
- Implementado el prototipo de termómetro infrarrojo se sacarán conclusiones en el Capítulo 6.
- Finalmente, en el Capítulo 7 se presenta el presupuesto del sensor de temperatura remoto diseñado.



# Capítulo 2

## Principios de la radiación infrarroja

Este capítulo describe el trabajo que se ha realizado para cumplir el primer objetivo del proyecto, basado en el estudio de los principios básicos de la termometría infrarroja.

El capítulo comienza considerando los fenómenos relacionados con la radiación infrarroja. En particular, estudiaremos como influye la radiación en los cuerpos, dependiendo del tipo de material, de la longitud de onda, emisividad y área de medición.

A continuación se muestra cómo podemos medir la radiación que emite un objeto al encontrarse a una cierta temperatura, siendo capaces de calcular la misma al estar directamente relacionada con la radiación. También se detalla la composición y funcionamiento de una termopila, con el fin de usar ésta para el desarrollo de un termómetro infrarrojo.

Al final de este capítulo tendremos los conocimientos necesarios para desarrollar un termómetro infrarrojo basado en una termopila.

## 2.1 Introducción

Todo cuerpo por encima del cero absoluto ( $-273.15^{\circ}\text{C} = 0 \text{ Kelvin}$ ) emite una energía electromagnética de su superficie, dentro del espectro de las radiaciones infrarrojas, invisible para el ojo humano, ya que se encuentra entre  $0,7$  y  $100 \mu\text{m}$ , es decir, por encima del espectro visible.

Los orígenes de la medición de las radiaciones infrarrojas (IR) se remontan al año 1800 donde William Herschel descompuso la luz solar en los distintos colores del espectro visible a través de un prisma, con el fin de medir el calor emitido por cada color por medio de un termómetro de mercurio. Descubrió que la temperatura de los colores del espectro aumentaba al ir del violeta al rojo, siendo más intensos en el infrarrojo próximo, zona que carece de luz. Herschel denominó a esta radiación "rayos calóricos", donde posteriormente tomaron el nombre de rayos infrarrojos o radiación infrarroja [OPT].

En 1800 fue posible medir la energía relativa de cada color, pero no fue hasta principios de siglo veinte cuando se pudo tener una medida de la energía de la radiación infrarroja. Se descubrió que esta energía es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura del objeto.

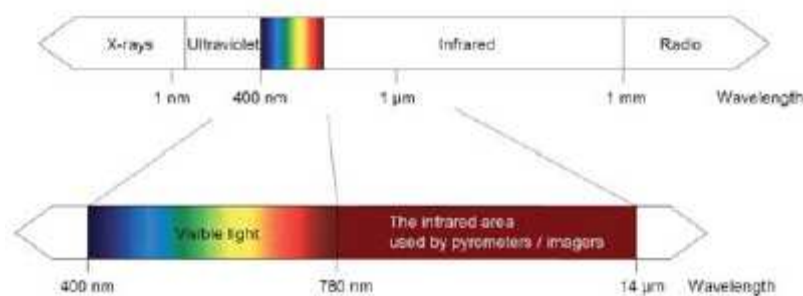


Figura 1. Espectro electromagnético.

El primer sensor de infrarrojo apareció hace 50 años aproximadamente y se basa en un dispositivo electrónico capaz de medir la radiación electromagnética infrarroja de los cuerpos en su campo de visión. Formado por un sensor óptico que recibe la energía térmica emitida por el objeto siendo posteriormente amplificada y liberalizada para su posterior procesamiento.

El tramo comprendido entre  $0,7$  y  $14 \mu\text{m}$  es el más importante para la medición de temperaturas por infrarrojo, ya que para longitudes de onda mayores los niveles de energía son muy bajos, no siendo captados por los sensores.

La medición con termómetros infrarrojos es aplicable a casos en los que no sea recomendable estar el sensor en contacto con la temperatura del objeto. Se usan en distintas aplicaciones como la medición de productos alimenticios, maquinaria en movimiento, superficies con temperaturas muy altas, etc. Otra ventaja es que permite una medida rápida en comparación con los termómetros de contacto, siendo esta cualidad importante en aplicaciones de cadenas de producción, en diagnósticos de pacientes, etc.

## 2.2 Fundamentos físicos

En torno al año 1900 Max Planck, Josef Stefan, Ludwig Edward Boltzmann, Wilhelm Wien y Gustav Kirchhoff establecieron correlaciones cualitativas y cuantitativas para describir la energía infrarroja.

A continuación se definen algunos términos y conceptos característicos de la energía radiante de tipo calorífico.

De toda la radiación que incide sobre una superficie, una parte puede absorberse por el cuerpo, otra reflejarse y una tercera transmitirse a través del mismo.

De esta manera se define:

- Coeficiente de absorción ( $a$ ): Fracción de la radiación absorbida por el cuerpo con respecto a la energía incidente.
- Coeficiente de reflexión ( $r$ ): Fracción de la radiación reflejada con respecto a la energía incidente.
- Coeficiente de transmisión ( $t$ ): Fracción de la radiación transmitida con respecto a la energía incidente.

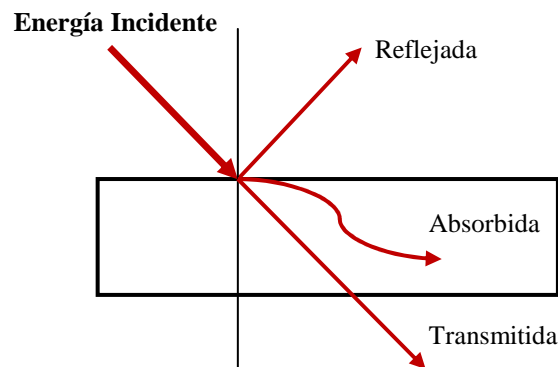


Figura 2. Absorción, reflexión y transmisión de la energía incidente.

La suma de estos coeficientes es igual a la unidad:

$$a + r + t = 1 \quad [1]$$

La absorción y la transmisión de un material dependen del espesor del mismo. Por ejemplo, para cuerpos opacos tendríamos que la transmisión es cero, quedando:

$$t = 0; \quad a + r = 1$$

Sin embargo, los gases suelen presentar valores muy elevados de transmisión, por lo que tienen valores de absorción y reflexión muy bajos. El aire tiene unos valores de absorción y reflexión prácticamente nulos para la radiación infrarroja. Otros gases, especialmente el anhídrido carbónico, pueden ser muy absorbentes para ciertas longitudes de onda de la radiación térmica, comprendidas en la banda de infrarrojo, aunque muy reflectantes o transparentes con respecto a otras longitudes de onda comprendidas en esta misma banda. En este trabajo sólo se va a trabajar con cuerpos opacos, cuya transmisión de la energía incidente es nula a través del mismo, por lo que parte de esta radiación incidente es absorbida por el cuerpo y la otra parte reflejada. La parte de radiación que se

refleja no afecta al cuerpo en sí, siendo radiación que se marcha. Sin embargo, la radiación que absorbe el cuerpo se invierte en aumentar la energía térmica del mismo, aumentando su temperatura.

Un cuerpo capaz de absorber toda la energía incidente se denomina cuerpo negro. La radiación que incide sobre éste no se refleja ni se transmite a través del mismo, de tal forma que sólo emite la radiación correspondiente a su temperatura. Un cuerpo negro perfecto no existe en la realidad, sino que es un objeto ideal que se utiliza como referencia respecto a otros radiadores.

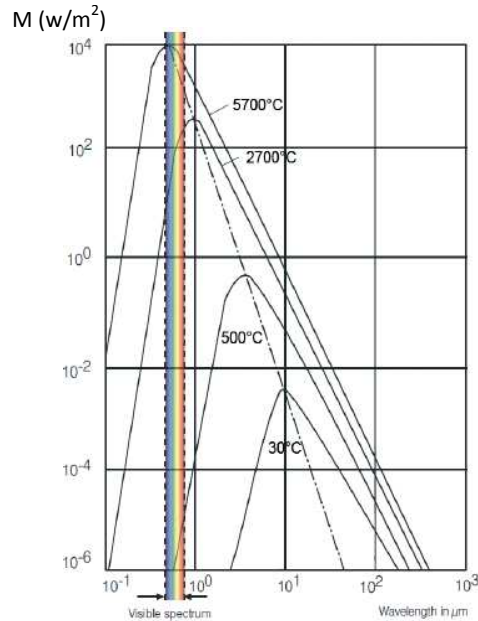


Figura 3. Espectro de radiación térmica de un cuerpo negro en función de  $\lambda$  [OPT].

Cuando un cuerpo está en equilibrio térmico con sus alrededores, su coeficiente de absorción y su emisividad son iguales (Ley de Kirchhoff). Teóricamente, la superficie ideal para la medición con termómetros infrarrojos está representada por un cuerpo negro, cuya emisividad es igual a uno.

La emisividad ( $\epsilon$ ) es la capacidad de un objeto de emitir o absorber energía. Se define como la relación entre la energía emitida por un objeto a una cierta temperatura y la emitida por cuerpo negro en la misma temperatura. Cualquier objeto o cuerpo real tiene valores inferiores a los de un cuerpo negro. Los valores de emisividad varían en función del material y se encuentran comprendidos entre cero y uno. A continuación se detallan algunos ejemplos:

Material	Especificación	Temperatura (°C)	Emisividad
Aluminio	Anodizado	100	0.55
Aluminio	Pulido	50 - 100	0.04 – 0.006
Asfalto		4	0.967
Pintura	Blanca	100	0.92
Pintura	Negro mate	100	0.97

Tabla 1. Valores de emisividad en función de la temperatura de medida [OPT].

La ley de radiación de Planck nos muestra la radiación emitida por un cuerpo negro situado a una cierta temperatura  $T$ , en función de la longitud de onda  $\lambda$  [VA98]. Quedando la radiación térmica por unidad de área  $A$  y en función de la longitud de onda:

$$M(\lambda, A) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda KT} - 1} = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad [2]$$

Siendo  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  la velocidad de propagación de la luz en el vacío, y  $c_1, c_2$  las constantes de radiación ( $c_1 = 3.74 \cdot 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ ,  $c_2 = 1.44 \cdot 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{m}$ ).

La intensidad total  $M(\text{W/m}^2)$ , de la radiación emitida por un cuerpo negro se obtiene integrando la expresión [2], en todo el espectro. De esta forma se obtiene la ley de Stefan Boltzmann, la cual establece que la energía emitida por un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta.

$$M(\lambda, A) = \sigma \cdot T^4 \quad [3]$$

$$\text{Con } \sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$$

Calculando la derivada primera de la ley de Planck [2] obtenemos la ley del desplazamiento de Wien, que afirma que el máximo de la intensidad de la radiación térmica emitida por un cuerpo negro se desplaza, con el aumento de la temperatura, hacia la región de longitudes de onda más corta.

$$\lambda_{max} \cdot T = 2.898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad [4]$$

Conocidos los fundamentos físicos de la radiación infrarroja podemos calcular la temperatura a la que se encuentra un objeto, teniendo en cuenta que la radiación recibida no sólo depende de la temperatura de su superficie, sino también de la radiación reflejada del ambiente, incluso de la radiación que penetra a través del mismo.

## 2.3 Tipos y funcionamiento de los termómetros infrarrojos

Existen dos grandes grupos de sensores para captar la radiación emitida por los cuerpos según su temperatura, detectores térmicos y cuánticos.

Los detectores cuánticos reaccionan ante la presencia de fotones aumentando el nivel de energía de los electrones del material del semiconductor, generando una señal eléctrica ante la variación de los niveles de energía de los mismos. Éstos son más rápidos que los detectores térmicos y selectivos en longitud de onda, es decir, su respuesta espectral varía en función de la longitud de onda

Un detector térmico está formado por un elemento sensible que varía en función de la absorción de la radiación electromagnética, cambiando las propiedades del material y en consecuencia la generación de una señal eléctrica proporcional a la radiación incidente sobre el mismo. Su respuesta espectral no varía en función de la longitud de onda, siempre y cuando la superficie presente las características de absorción de un cuerpo negro. Dentro de estos detectores podemos destacar tres tipos [VA98]:

- Detectores de bolómetro: Se basa en una resistencia que depende de la temperatura, encontrándose completamente ennegrecido para que se comporte como un cuerpo negro, es decir, debe absorber toda la radiación que incida sobre él.
- Detectores piroeléctricos: Se basan en un efecto que se manifiesta sobre materiales ferroeléctricos, para el cual la polarización en ese material disminuye con la temperatura hasta una temperatura denominada de Curie, por debajo de la cual la polarización es cero. Si el ferroeléctrico se calienta, varía la polarización y por tanto la carga que se deposita en dos electrodos. Este desplazamiento de carga da lugar a una intensidad eléctrica que se puede medir.
- Detectores de termopila: Formados por un conjunto de termopares en serie que producen un voltaje a la salida proporcional a la radiación recibida. El termopar está formado la unión de dos metales diferentes que producen un voltaje en función de la diferencia de temperatura entre ambos metales.

En este proyecto nos vamos a centrar en los detectores térmicos, concretamente detectores de termopila.



## 2.4 Construcción y funcionamiento de una termopila

Una termopila está formada por un conjunto de termopares interconectados en serie entre ellos, cada uno de los cuales está formado por dos materiales diferentes con polaridades opuestas. Los termopares son emplazados en regiones calientes y frías aisladas térmicamente. Las uniones frías se colocan en un sustrato de silicio para disipar el calor, siendo esta unión conectada a una referencia conocida. Por otro lado, en las regiones calientes hay un cuerpo negro que absorbe la radiación infrarroja, elevando la temperatura de acuerdo a esta radiación. De esta forma se genera un voltaje proporcional a la diferencia de temperatura en los termopares, estando comprendido entre decenas o cientos de milivoltios. Otra cualidad es que no precisan de una fuente externa de polarización.

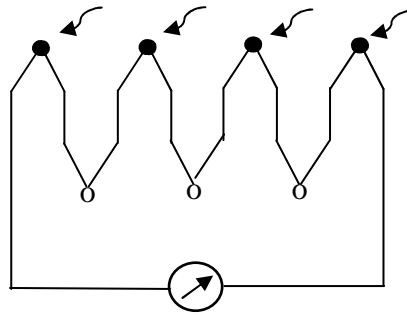


Figura 4. Esquema básico de una termopila.

Además de los termopares, la termopila incorpora dentro del encapsulado un termistor, con la finalidad de compensar la temperatura ambiente a la que se encuentra la misma. Este termistor es de tipo NTC, siendo una resistencia de material de semiconductor cuyo valor disminuye a medida que aumenta la temperatura.

En la figura 5 se muestra la composición de la termopila, formada por la propia termopila encargada de suministrar un voltaje proporcional a la radiación incidente, y el termistor, cuyo propósito consiste en compensar la temperatura ambiente.

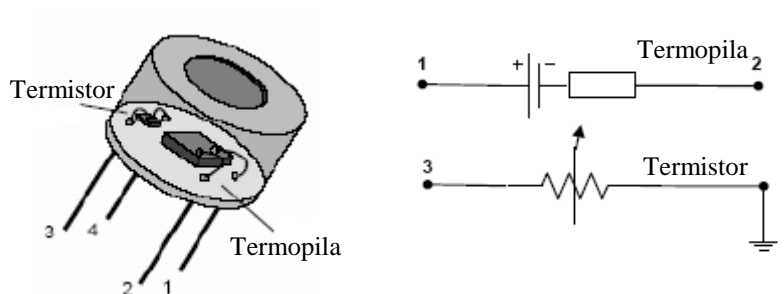


Figura 5. Composición de la termopila.

La tensión generada por la termopila,  $V_{tp}$ , es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura a la que se encuentra el objeto de medida, según la ley de Stefan Boltzmann [3], por lo que si consideramos la radiación reflejada por el ambiente y la propia del detector tenemos que [OPT]:

## 2.4 Construcción y funcionamiento de una termopila

$$V_{tp} = K \cdot (\varepsilon \cdot T_{obj}^4 + (1 - \varepsilon) \cdot T_{amb}^4 - T_{disp}^4) \quad [5]$$

Donde  $K$  se corresponde con la constante o sensibilidad del dispositivo, la emisividad del material de medida viene expresada por el parámetro  $\varepsilon$ , siendo  $(1 - \varepsilon)$  la reflexión en el objeto de medida debida a la temperatura ambiente,  $T_{amb}$ . El valor de la temperatura del objeto viene representado por medio de  $T_{obj}$ , y finalmente  $T_{disp}$  representa la temperatura del propio dispositivo de medida. Todos los valores de estas temperaturas son expresados en Kelvin.

Asumiendo que el dispositivo siempre va a estar expuesto a la misma temperatura ambiente que la del objeto de medida, podemos simplificar la ecuación anterior [5], quedando la expresión de temperatura del objeto de la siguiente manera:

$$T_{obj} = \sqrt[4]{\frac{V_{tp}}{K \cdot \varepsilon} + T_{amb}^4} \quad [6]$$

La constante  $K$  depende de la sensibilidad de cada dispositivo, por lo que es preciso calibrarla a partir de un sensor de referencia.

La temperatura ambiente se obtiene a partir de la resistencia del termistor,  $R_{th}$ , cuyo valor varía exponencialmente con la temperatura:

$$R_{th} = R_0 \cdot e^{\beta \cdot \left( \frac{1}{T_{amb}} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad [7]$$

Donde  $R_0$  es el valor de resistencia del termistor a la temperatura de referencia  $T_0$ , expresada en Kelvin, y el parámetro  $\beta$  es una constante asociada al material con el que se fabrica el termistor, variando entre 2000 y 6000K. Estos parámetros de referencia son proporcionados por el fabricante, obteniendo la temperatura ambiente en función del valor de la resistencia proporcionada por el termistor a dicha temperatura a partir de la expresión anterior.

$$T_{amb} = \left[ \frac{1}{\beta} \cdot \ln \frac{R_{th}}{R_0} + \frac{1}{T_0} \right]^{-1} \quad [8]$$

Conociendo la respuesta del termistor y termopila podemos conocer la temperatura a la que se encuentra el objeto de medida. En primer lugar debemos conocer la sensibilidad de nuestro dispositivo ( $K$ ), así como la emisividad ( $\varepsilon$ ) del material a medir. Con estos datos comenzamos obteniendo el valor de la temperatura ambiente a través del valor de la resistencia del termistor [8], para posteriormente adquirir el valor de la tensión proporcionada por la termopila y poder calcular a partir de la ecuación [6] el valor compensado de la temperatura del objeto.

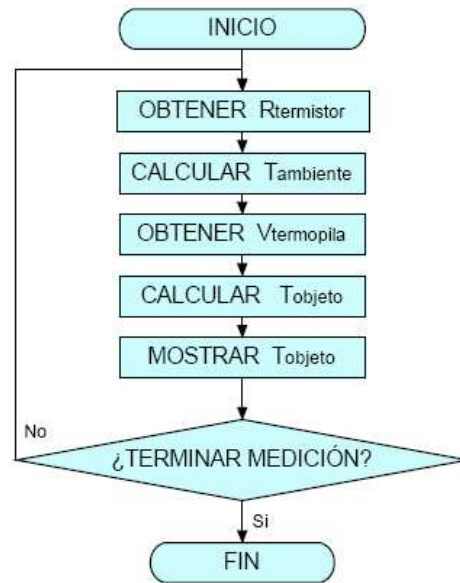


Figura 6. Flujograma de lectura  $T_{\text{objeto}}$ .

Este flujograma representa la sucesión de pasos a realizar para obtener la temperatura del objeto de medida, calculando en un primer lugar la temperatura ambiente para posteriormente obtener la temperatura del objeto compensada con la misma.

## 2.5 Conclusiones

En este capítulo se ha descrito desde el origen de la radiación infrarroja, emitida por una material al estar situado a una cierta temperatura, hasta la captación y cuantificación de la misma mediante una termopila.

Los conceptos y fundamentos físicos sobre la radiación infrarroja nos han permitido conocer el comportamiento, captación y medida de la misma, mediante el uso de las teorías y leyes formuladas por Planck, Stefan, Boltzmann, Wien y Kirchhoff.

Por otro lado, se han detallado distintos tipos de detectores infrarrojos, centrándonos en la termopila. Ésta forma parte de los detectores térmicos, capaz de obtener la temperatura de un objeto conocida su emisividad, estableciendo en detalle su composición y funcionamiento de la misma.

Con estas bases de funcionamiento podemos llevar a cabo el diseño de un termómetro infrarrojo basado en una termopila, mediante el desarrollo de la parte electrónica y óptica que lleva asociada la misma, así como el diseño mecánico que conlleva el conjunto.



# Capítulo 3

## Clasificación y mercado de las termopilas

Este capítulo se centra en el estudio y búsqueda de los diferentes tipos de termopilas que actualmente se encuentran en el mercado atendiendo a sus principales características, clasificando sus respectivos proveedores con el fin de seleccionar aquella termopila que cumpla con nuestras necesidades de servicio para llevar a cabo el desarrollo de nuestro sensor.

En el capítulo anterior, se demostró el funcionamiento y la construcción de las termopilas, por lo que ahora nos centraremos en las características más importante o determinantes de cada una, según el fabricante. Se realizará una búsqueda global a través de la web, archivando los diferentes proveedores existentes actualmente en el mercado, seleccionando las termopilas más significantes de cada uno, atendiendo a su campo de visión, rangos de temperatura, encapsulado, así como el tipo de salida que proporcionan (digital o analógica). Además, se ha conseguido establecer contacto con la mayoría de estos proveedores, proporcionándonos información adicional sobre características técnicas de las termopilas, precios en función de las unidades, plazos de entrega e incluso ejemplares de muestras.

Finalmente, tras esta clasificación podremos concretar el modelo de termopila a usar para nuestro termómetro infrarrojo.

## 3.1 Clasificación

Para la consecución de nuestro principal objetivo fue necesario realizar una búsqueda de fabricantes y distribuidores existentes actualmente en el mercado, clasificando los distintos tipos de termopilas, con el fin de encontrar aquella que mejor se adaptase a nuestros requisitos.

Para seleccionar una termopila hay que tener en cuenta una serie de características determinantes para su aplicación:

- Rango de temperatura del objeto: Intervalo en el que se debe situar la temperatura del material de medida, para que ésta pueda ser captada por la termopila.
- Rango de temperatura ambiente: Intervalo en el cual el dispositivo se encuentra en condiciones óptimas de operación.
- Precisión: Grado de error en la medición, expresado en % con respecto a la temperatura de medida, o en °C con respecto al fondo de escala. Como se podrá comprobar a lo largo del proyecto la precisión de los sensores de temperatura infrarrojos dependen fuertemente de la temperatura del objeto de medida, así como de la diferencias de temperaturas entre el objeto y el sensor.
- Encapsulado: Todos los encapsulados utilizados en termopilas son del tipo TO-, variando exclusivamente su diámetro y altura.
- Campo de visión: Ángulo de abertura para el cual la termopila capta una cantidad específica de energía radiada procedente del objeto de medición. Es expresado en grados. La superficie de medida debe rellenar completamente el campo de visión para asegurar una medida exacta de la temperatura. Característica importante en una termopila, ya que esta abertura influye de forma directa en la distancia a la que se debe encontrar el objeto de medición, así como su área.
- Tipo de salida: Analógica o digital. Este es un aspecto importante, dado que si la termopila proporciona una salida analógica posteriormente hay que realizar una conversión a formato digital para su procesamiento. Sin embargo, las termopilas con salida digital, además de tener dentro del encapsulado la termopila y el termistor, poseen un ASIC (Application Specific Integrated Circuit), que incluye toda la electrónica de acondicionamiento, un conversor Analógico-Digital e interfaz de comunicaciones. El encapsulado es mayor con respecto a la termopila con salida analógica pero dependiendo de la aplicación pueden dar a un sistema más compacto.

La búsqueda de distribuidores de termopilas se realizó durante varios días a través de la web, estableciendo contacto con la mayoría de los proveedores mediante correo electrónico y llamadas telefónicas. A fecha de este proyecto, Octubre 2012, se muestran los distintos proveedores existentes en el mercado junto a los principales modelos de termopilas que proporcionan.

- **HeimannSensor** [HETE].  
Empresa alemana líder en el mercado de los sensores de termopila infrarrojos. Ofrece una amplia gama de termopilas destacando aquellas de salida digital, ya que se corresponden con una de sus novedades de este año,

Thermopile Module HID L1x FL5.5 (LS) Tx. Esta termopila posee internamente una memoria RAM donde almacena en todo momento el valor de la temperatura ambiente y objeto, alcanzando estos valores con una simple lectura de memoria por medio de un interfaz SMBus o PWM. Cabe destacar que la temperatura del objeto que proporciona ya se encuentra compensada con la temperatura ambiente. Además incorpora una lente de 5mm de distancia focal, con relación óptica D:S 8:1, lo cual permite medir objetos a grandes distancias, ya que su ángulo de abertura es muy pequeño. Posee encapsulado TO-5 y su resolución es inferior a 1°C, con una temperatura máxima de operación de 382°C. Su precio asciende a 50€, siendo su plazo de entrega inferior a 2 semanas.

Como termopila simple se encuentra el modelo HMS-M Series con salida analógica, que incorpora una lente en su interior proporcionando un campo de visión de 34°. Esta termopila tiene un encapsulado TO-46 y su coste varía según el número de unidades solicitadas, siendo 14€ si se adquiere 1 unidad, 11.50€ de 2 a 50 unidades, 5.40€ de 51 a 100 y 3.9€ si oscila entre 100 y 200 unidades.

Se adquirieron 5 ejemplares de este último modelo y dos del modelo anterior con salida digital, por medio de Antje Springer (scheidulin@heimannsensor.com), encargada del departamento de ventas de la empresa. La adquisición de estos modelos, reside en su posterior uso para llevar a cabo el desarrollo de nuestro termómetro infrarrojo, debido a su baja abertura de visión y a su amplio intervalo de temperaturas de medición, requisitos que implantaremos más adelante.

- **Excelitas** (Distribuidora en España, *Setron*) [EXTE].

Esta empresa dejó de cooperar con su distribuidor español este año, pero sí poseen un distribuidor alemán que tiene actividades en el mercado español, *Setron*. Ofrece dos grandes grupos de termopila, montadas en módulos de PCB capaces de compensar la temperatura ambiente, y simples, ambos modelos con salida analógica. Dentro de cada uno de estos grupos existe una gran variedad dependiendo de su uso (detector de gases, medición de temperatura...).

La termopila simple TPD 1T 0226 L5.5 incorpora una lente, proporcionando un campo de visión de 7°, prácticamente mínimo, logrando operar entre -20 y 60°C. Su precio es de 8.15€ con un plazo de entrega de 8 semanas.

Por otro lado, el modelo TPM 1T 0136 L5.5 se encuentra formado por una PCB que dispone de un circuito acondicionador encargado de compensar la temperatura ambiente. Por este motivo, su precio es más elevado que el modelo anterior, siendo de 16.65€ y el plazo de entrega puede ascender a 12 semanas.

Esta empresa nos proporcionó dos muestras sin compromisos de ambos modelos, por medio de Maria Länger (Maria.Laenger@setron.de), ingeniera responsable de las aplicaciones de todos los productos de termopila *Excelitas*.

- **Nicera** [NITE].

Situada en Reino Unido, esta empresa se dedica a la producción de detectores infrarrojos y también actúa distribuyendo productos fabricados por otras dos empresas de China. Al igual que la anterior empresa, ésta proporciona termopilas simples y en módulo. Debido a la falta de información que ofrece su página web sobre estos sensores, fue necesario ponerse en contacto para obtener las características de los mismos.

Luke Habgood (luke@nicera-uk.com), representante de ventas de la empresa, nos proporcionó la hoja de características de dos modelos de termopilas.

Termopila simple TSL-SINAU-C, preparada para operar en un rango de temperaturas comprendido entre -30 y 60°C, siendo capaz de obtener la temperatura de un objeto que se encuentre entre -30 y 70°C, con un campo de visión relativamente pequeño, 10°. Posee un encapsulado TO-5.

Sin embargo, el modelo TSUP-6C3-1U, consiste en una termopila montada sobre un módulo de PCB en el que se encuentra el circuito acondicionador de termopila y termistor. Este módulo proporciona una salida de tipo analógico sin compensación de la temperatura ambiente. Pensado para operar en ambientes donde la temperatura se encuentra entre 0 y 80°C, para unas temperaturas del material de medida comprendidas entre -30 y 100°C. Éste tiene una precisión de 2°C, cuando se opera en temperaturas elevadas, siendo de 3°C para temperaturas inferiores a 60°C. Además incorpora una lente, al igual que el modelo anterior, proporcionando un campo de visión de 10°.

- **MMS-Electronics** [MMST].

Compañía dedicada a la distribución de componentes y fabricación de sistemas electrónicos. Opera como distribuidora de Reino Unido para otras cuatro empresas, *Smartec*, *Electronic Assembly*, *TAB* y *PICSHOP*.

Ofrece varios tipos de termopilas simples y módulos con salida digital. La termopila simple SMTIR9902SIL, permite la medición de -40 a 100°C en un ambiente de trabajo comprendido entre -20 y 100°C. Ésta se encuentra encapsulada en TO-5, con un campo de visión de 7.27°, siendo su precio de 19.50€.

El módulo SMTIRMOD09 incorpora una termopila donde su ángulo de abertura puede ser elegido entre 14 y 120°. Éste suministra una salida digital a través de un interfaz con bus I<sup>2</sup>C, aunque también se encuentran disponibles con conexión USB. Su temperatura de medición oscila entre 0 y 300 °C, a una temperatura ambiente comprendida de 0 a 85°C. Posee una resolución de 2°C y tiene un coste de 41.45€.

Para realizar algún pedido u obtener más información sobre estas termopilas es necesario ponerse en contacto con Marc Arijs a través de su correo electrónico marc@mms-e.co.uk, marc@smartec.co.uk.



- ***EOC-INC*** [EOCT].

Empresa de EE.UU. especialista en detectores de termopila en función de su aplicación, medición de temperatura sin contacto, análisis de gases y monitorización de presencia, entre otros. Nosotros nos hemos interesado en el modelo TS1x80B-A-D0.5-. Éste trabaja entre -20 y 85°C con temperatura ambiente entre -20 y 100°C. Este dispositivo ostenta de un campo de visión de 53.1°. Tiene un precio muy elevado, 74€, debido a que esta empresa no tiene ningún distribuidor en Europa, tardando entre 2 y 3 semanas desde la realización del pedido. Esta información ha sido proporcionada por Primo Galban (primogalban@eoc-inc.com), miembro del departamento de ventas de la empresa.

- ***Dexter*** [DEXT].

Se puede considerar como la compañía líder en detección infrarroja de EE.UU., ofreciendo distintas soluciones en este campo. Tiene diferentes variedades de termopilas según aplicación, ofreciendo además la posibilidad de fabricación de la termopila según los parámetros del usuario. Bill McMillan (bmcmillan@dexterresearch.com) nos suministró información sobre la termopila ST60R/4.4 FL AR LENS A1/A2, de encapsulado TO-5, cuya temperatura de medición se encuentra entre -50 y 100°C, en un ambiente de -20 a 100°C. Dotada con un ángulo de abertura muy pequeño, concretamente 9°.

Su precio y plazo de entrega varían en función del número de unidades. Hasta 9 unidades el precio es de 62€, y entre 10 y 49 unidades el precio disminuye a 47€, con un plazo de entrega de 2 semanas. Con pedidos entre 50 y 99 unidades el plazo de entrega aumenta una semana más y su precio se sitúa en 40€.

En caso de que la termopila tenga la necesidad de ser diseñada, absenta de características estándar, se deberá abonar un suplemento de 38.6€ debido al desarrollo de la documentación de características del dispositivo.

- ***Measurement Specialties*** [MESP].

Diseñador y fabricante de sensores de varias tipologías, temperatura, humedad, presión, etc. Opera en EE.UU., Europa y China. Dentro de los sensores de temperatura basados en infrarrojos encontramos dos grupos de termopilas, simples y en módulo. Destacamos el modelo TS105-10L5.5 NTC 100K, con un intervalo de operación de -20 a 100°C, campo de visión de 30°. La información de su precio fue proporcionada por Jasmin Ollig (jasmin.ollig@meas-spec.com), dependiendo éste del número de unidades. Hasta 400 unidades el precio es de 9.12€ y 7.61€ hasta 1000.

El módulo de termopila TSEV0108L39, opera entre -30 y 85°C, con un rango de medida de -10 a 85°C, con abertura de 40° y proporciona una salida digital, con interfaz SPI.

- ***Pacer*** [PATE].  
Es un proveedor especializado en optoelectrónica, soluciones láser y pantallas digitales, que opera en todo el mundo, con sede en EE.UU.  
Todos los modelos de termopila que suministra esta empresa se encuentran montados sobre módulo de PCB, con lente integrada. Por ejemplo, el modelo TPM 1T 0236 L5.5 OBA 060 P7 ofrece un campo de visión de 5°, con una temperatura ambiente y de medida comprendida entre -20 y 60°C. No se dispone de más información debido a que no se consiguió establecer contacto con esta empresa.
- ***LaserComponents*** [LACO].  
Dedicada al trabajo de componentes optoelectrónicos, operando en Europa, América y Asia.  
Ofrece una gran variedad de termopilas dentro de la serie ST60 que comprenden un rango de medida de -50 a 100°C, con aberturas angulares que abarcan de 36 hasta 111°, según el modelo. Esta serie es proporcionada por el fabricante *Dexter*, ya que dentro de ésta se encuentra el ejemplo anteriormente mencionado. No se dispone de una mayor información al no ser posible el contacto con esta empresa.
- ***GE Measurement & Control*** [GESR].  
Empresa innovadora en los sistemas de medición, inspección y control. Se encuentra distribuida por todo el mundo y al igual que la mayoría de las empresas mencionadas posee termopilas en módulo y simples.  
Por ejemplo, la termopila ZTP-135SR con salida analógica tiene un intervalo comprendido entre -40 y 120°C de temperatura objeto, operando a una temperatura ambiente entre -20 y 100°C. Posee encapsulado TO-41 y un campo de visión de 170°. Mientras que el módulo ZTP-188ML opera en el mismo rango de temperaturas, y además dispone de lente incorporada ofreciendo un ángulo de apertura de 52°. Este módulo tiene la capacidad de compensar la temperatura ambiente ofreciendo una salida digital con interfaz I<sup>2</sup>C.  
Del primer modelo ZTP-135SR con salida analógica se disponen de dos ejemplares en el laboratorio, con los que se realizarán unas primeras pruebas hasta la llegada de las termopilas adquiridas a *HeimannSensor*.

Llegado a este punto se dispone de diez distribuidores de termopilas diferentes, con los cuales se ha establecido contacto con siete de ellos, ofreciéndonos características adicionales no registradas en sus respectivas webs, precios, plazos de entrega e incluso muestras para investigación.

Realizada esta búsqueda se dispone de información más que suficiente para seleccionar cualquier tipo de termopila capaz de adaptarse a las características o necesidades deseadas. A continuación se muestra una tabla con las características más importantes de los proveedores y termopilas encontrados.

Empresa	Dirección web	Modelo de termopila	Campo de visión	Rango de temperaturas (T <sub>obj.</sub> / T <sub>amb.</sub> )	Tipo de salida	Precio (Unidades)	Plazo de entrega (Semanas)	Referencia del contacto
HeimannSensor	www.heimansensor.com	HMS-M Series with Lens L3.0	34°	-40 120°C/-20 120°C	Analógica	14€ (1), 11,50€ (2-50), 5,40€ (50-100), 3,90€(100-200)	2	scheidulin@heimannsensor.com Antje Springer
		Module HID L1x FL5.5 (LS) Tx (PWM)	8:1	Tmax 382°C	PWM, SMBus	50€	2	
Excelitas (Setron en España)	www.excelitas.com www.setron.de	TPD 1T 0226 L5.5	7°	-20 60°C / -20 60°C	Analógica	8,15€	8	Maria.Laenger@setron.de Maria Länger
		TPM 1T 0136 L5.5 (Compensa T <sub>amb.</sub> )	7°	-20 60°C / -20 60°C	Analógica	16,65€	8 - 12	
Nicera	www.nicera-european.co.uk	TSL-SINAU-C	10°	-30 70°C / -30 60°C	Analógica	---	---	luke@nicera-uk.com Luke Habgood
		TSUP-6C3-1U	10°	-30 100°C / 0 80°C	Analógica	---	---	
MMS-Electronics	www.mms-e.co.uk	SMTIR9902SIL	7.27°	-40 100°C/-20 100°C	Analógica	19,50 €	---	marc@mms-e.co.uk marc@smarteec.co.uk
		SMTIRMOD09	14° /90°	0 300°C / 0 85°C	I2C	41,45 €	---	Marc Arijs
EOC-INC	www.eoc-inc.com	TS1x80B-A-D0.5-	53.1°	-20 85°C / -20 100°C	Analógica	74 €	2 - 3	primogalban@eoc-inc.com Primo Galban
Dexter	www.dexterresearch.com	ST60R/4.4 FL AR LENS A1/N2	9°	-50 100°C/-20 100°C	Analógica	62 € (1-9), 47 € (10-49), 40€ (50-99)	4	bmcemillan@dexterresearch.com Bill McMillan
Measurement Specialties	www.meas-spec.com	TS105-10 L5 5 NTC100K TSEV0108L39	30° 40°	-20 100°C/-20 100°C -30 85°C/-10 85°C	Analógica SPI	9,72 € (1-399), 7,61 € (400-1000)	8	Jasmin.Ollig@meas-spec.com Jasmin Ollig
Pacer	www.pacer.co.uk	TPM 1T 0236 L5.5 OBA 060 P7	5°	-20 60°C / -20 60°C	Analógica	---	---	---
		TPM 1T 0136 L5.5 OBA 300 P7	7°	-20 300°C/-20 300°C	Analógica	---	---	---
LaserComponents	www.lasercomponents.com	ST60	36/111°	-50 100°C/-50 100°C	Analógica	---	---	---
GE Measurement & Control	www.ge-mcs.com	ZTP-135SR	170°	-40 120°C/-20 100°C	Analógica	...	...	...
		ZTP-188ML	52°	-40 120°C/-20 100°C	I2C	...	...	...

Tabla 2. Distribuidores de termopilas en el mercado.

## 3.2 Conclusiones

En este capítulo se ha descrito las características principales a tener en cuenta para la selección de una termopila, como son el campo de visión, rango de temperaturas ambiente y de medida, tipo de salida, encapsulado y precisión.

Con ello se han ido seleccionando los distintos tipos de termopilas en función de cada proveedor. Estos proveedores han sido archivados tras una búsqueda global a través de la web, estableciendo contacto con la mayoría de ellos, de forma que nos suministraron precios en función del número de unidades, plazos de entrega, información adicional sobre características concretas, e incluso proposición de termopilas alternativas capaces de cumplir con nuestros requisitos para llevar a cabo el diseño de nuestro termómetro infrarrojo.

Finalmente, se adquirieron los modelos HMSM21L3.0F5.5 y HDI L14 FL5.5 T100 de la casa *HeimannSensor*, usando el primer modelo para el diseño y desarrollo de nuestro sensor, ya que proporciona los requisitos para satisfacer las necesidades del sistema deseado. Por otro lado, se realizó un circuito de acondicionamiento y un pequeño software de control, con la finalidad de comprobar el funcionamiento del segundo modelo. Esto se muestra en el Anexo 2, no entrando en grandes detalles del mismo al no formar parte de este proyecto.

También se recibieron dos muestras de forma gratuita por parte de la compañía *Excelitas*, los modelos TPD 1T 0226 L5.5 y TPM 1T 0136 L5.5 mencionados anteriormente, no siendo usados hasta el momento debido a la tardía entrega por parte de la empresa.

Con este capítulo se ha conseguido una clasificación de los diferentes tipos de termopilas en función de cada proveedor, obteniendo el modelo a utilizar para nuestro sistema.

# Capítulo 4

## Diseño e implementación de un termómetro infrarrojo

Conocido el modelo de termopila a usar para nuestro dispositivo, nos disponemos a desarrollar y calibrar todo el sistema que lleva incorporado. En este capítulo se muestra el diseño del circuito electrónico acondicionador de nuestro termómetro, todo el sistema óptico asociado, así como el sistema de adquisición de temperatura, con todo el software de procesamiento que conlleva. Posterior a este diseño se realiza una calibración de todo el sistema utilizando como referencia un segundo sensor basado en el mismo principio de funcionamiento.

El sensor de temperatura remoto a diseñar debe de ser capaz de operar para una temperatura del objeto de medida comprendida entre  $-20$  y  $20^{\circ}\text{C}$ , cuya temperatura ambiente del dispositivo debe de situarse en un intervalo de  $-20$  a  $30^{\circ}\text{C}$ . La distancia entre el dispositivo de medida y objeto debe de ser de al menos 1.5 metros, para un área eficaz mínimo del objeto de medida de  $200 \times 200 \text{mm}^2$ . Cabe destacar, que los objetos de medición empleados para este sensor poseen valores de emisividades muy altos, cercanos a uno.

Conocidos los requisitos o necesidades que debe de satisfacer nuestro sensor podemos comenzar el diseño y desarrollo de nuestro dispositivo.

## 4.1 Termopila

En un primer momento se llevó a cabo el desarrollo del sensor con una termopila de la casa *GE-Measurement&Control* [GESR], modelo ZTP-135SR. El motivo de la utilización de este modelo se debe a que se disponen de dos ejemplares en el laboratorio. Esta termopila tiene un ángulo de visión demasiado grande, concretamente 170 grados, ya que carece de lente interna. Por esta característica fue rechazada la opción de desarrollar el termómetro de infrarrojos con esta termopila.

Dados los requisitos de nuestro sistema nos decantamos finalmente por el modelo HMSM21L3.0F5.5 del fabricante *HeimannSensor* [HETE]. Este modelo posee una lente incorporada lo que nos permite un ángulo de visión reducido, en torno a los 34 grados, con filtro para una longitud de onda comprendida entre 8 y 20 $\mu$ m, y una distancia focal de 3mm.



Figura 7. Termopila HMSM21L3.0F5.5 [HETE].

El rango de temperatura ambiente de esta termopila se encuentra comprendido entre -20 y 120°C, situándose los límites de la temperatura de medición entre -40 y 120°, intervalos que engloban nuestro rango de trabajo requerido.

El fabricante proporciona para el termistor interno un valor  $\beta$  de 3940K (25°C, 50°C) y un valor  $R_0$  de 100k $\Omega$  para una temperatura de referencia  $T_0$  de 25°C.

## 4.2 Circuito de adquisición de temperatura

La tensión suministrada por la termopila es proporcional a la temperatura de medida, siendo ésta compensada con la temperatura ambiente recogida a través del termistor. Por ello, vamos a dividir el circuito de adquisición de temperatura en tres subcircuitos, circuito de temperatura ambiente o circuito termistor, circuito de temperatura del objeto o de termopila y el circuito de alimentación de ambos, siendo la tensión proporcionada por éste último de 5V para todo el sistema.

### 4.2.1 Circuito termistor

El termistor es un sensor resistivo sensible a la temperatura, por lo que se establece un divisor de tensión con el mismo, obteniendo un valor de tensión proporcional a dicha temperatura. Para que el valor de tensión de salida no se vea afectado por el equipo de medición o la tarjeta de adquisición de datos, se ha incorporado un *buffer* a la salida de dicho divisor para subsanar este problema.

## 4.2 Circuito de adquisición de temperatura

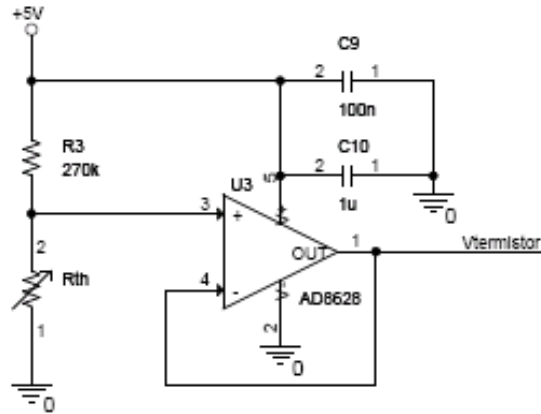


Figura 8. Circuito acondicionador del termistor.

La resistencia del termistor,  $R_{th}$ , proporciona un valor que varía exponencialmente con la temperatura, disminuyendo el valor de resistencia a medida que aumenta la temperatura [7].

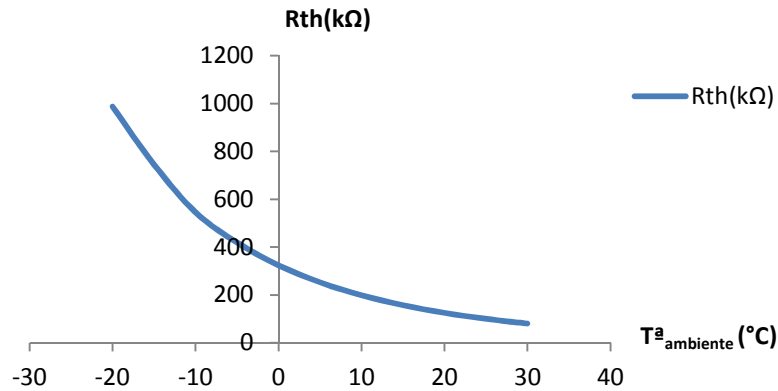


Figura 9. Comportamiento del termistor frente a la temperatura ambiente.

Dado el comportamiento no lineal del termistor, el objetivo es encontrar un valor de  $R_3$  para el divisor de tensión, que proporcione una linealidad óptima en el margen de temperaturas de trabajo.

$$V_{termistor} = V_{cc} \cdot \frac{R_{th}}{R_3 + R_{th}} \quad [9]$$

Teniendo en cuenta la tensión de alimentación de 5V del sistema, y un rango de temperatura ambiente comprendido entre -20 y 30°C, nos hemos decantado por un valor de  $R_3$  de 270kΩ. Con este valor se consigue máxima linealidad, ya que coincide con el valor de resistencia de termistor a temperatura media de nuestro rango de trabajo, comprendida en torno a los 4°C [7].

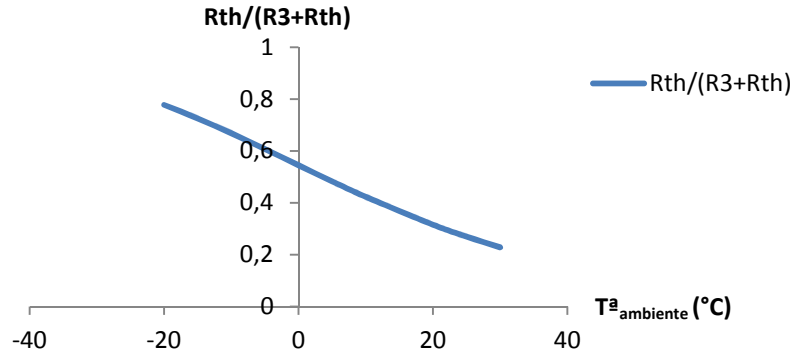


Figura 10. Respuesta del divisor de tensión del termistor para diferentes valores de temperatura.

De esta manera, se obtiene una señal de salida prácticamente lineal,  $V_{\text{termistor}}$ , con una tensión de salida que disminuye a medida que aumenta la temperatura, proporcionando una tensión de salida que oscila entre 4 y 1V, para un rango de temperaturas comprendido entre -20 y 30°C. Con este valor de tensión obtenemos el valor de la resistencia del termistor,  $R_{th}$ , despejando de [9] el mismo, obteniendo la siguiente expresión:

$$R_{th} = \frac{R_3}{\frac{V_{cc}}{V_{\text{termistor}}} - 1} \quad [10]$$

Finalmente, para poder calcular la temperatura ambiente el fabricante nos proporciona los parámetros del termistor. Un valor de 3940K para la constante  $\beta$ , en un rango de temperaturas comprendido entre 25 y 50°C, y un valor de  $R_0$  de 100k $\Omega$  para una temperatura de referencia de 25°C. Con estos valores y el valor de la resistencia del termistor proporcionado por la expresión anterior [10], podemos obtener la temperatura ambiente a la que se encuentra nuestro dispositivo sustituyendo los mismos en [8].

$$T_{amb} = \left[ \frac{1}{\beta} \cdot \ln \frac{R_{th}}{R_0} + \frac{1}{T_0} \right]^{-1} \quad [8]$$

$\beta=3940\text{K}; R_0 = 100\text{k}\Omega @ 298.15\text{K}$

### 4.2.2 Circuito termopila

La termopila se encuentra acondicionada por un circuito encargado de suministrar una tensión de salida proporcional a la temperatura del objeto, sin ser compensada con la temperatura ambiente. Este circuito se muestra en la figura 11.

La termopila suministra una tensión entre terminales proporcional a la temperatura del objeto, por lo que en el terminal negativo se ha establecido una tensión de referencia de 2V,  $V_{\text{Ref}}$ , a través de un divisor de tensión. Sobre esta tensión de referencia se superpone la tensión suministrada por el terminal positivo, el cual ha sido llevado a un amplificador de bajo ruido. Éste se encuentra en configuración no inversora y con una ganancia de 1000V/V, ya que recordamos que la tensión proporcionada por la termopila es del orden de milivoltios. Se ha escogido un amplificador operacional de bajo ruido de



altas prestaciones, modelo AD8628 [AD86] del fabricante Analog Device, indicado para este tipo de operaciones. La elección de este modelo se debe a que ofrece muy baja deriva de offset, presentando un valor máximo de  $0.02 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . De esta manera se alcanza un valor máximo para nuestro circuito de  $1 \mu\text{V}$ , correspondiente para una diferencia de temperatura de  $50^\circ\text{C}$ , comprendida en nuestro intervalo de operación situado entre  $-20$  y  $30^\circ\text{C}$ .

La resistencia  $R_5$  y el condensador  $C_6$  limitan el ancho de banda del circuito, dando lugar a un ancho de banda equivalente de ruido aproximadamente de  $2\text{Hz}$ , predominando de esta forma el ruido de baja frecuencia que según las hojas de características del operacional es de  $0.5 \mu\text{Vp-p}$  de  $0.1$  a  $10\text{Hz}$ . A partir de este dato, se pueden despreciar el resto de las componentes de ruido, tanto del operacional como de la termopila, al estar situadas tres órdenes de magnitud por debajo de este valor para un ancho de banda de  $2\text{Hz}$ . Este amplificador es el que limita el tiempo de respuesta del sensor a  $0.2$  segundos.

Tanto la deriva de offset como el ruido generado son despreciados, ya que la señal de la termopila es del orden de milivoltios. Sin embargo, hay que tener en cuenta el offset presentado por el operacional, ya que puede alcanzar un valor máximo de  $10 \mu\text{V}$ . En el apartado de calibración será calculado este valor de offset que presenta nuestro operacional.

Además, con el fin de eliminar toda interferencia o ruido posible de la tensión de alimentación, se ha dotado al circuito de los condensadores oportunos.

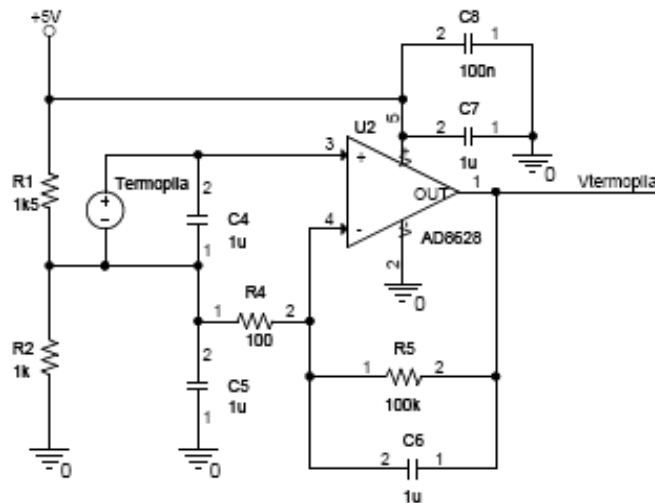


Figura 11. Circuito acondicionador de la termopila.

La tensión de salida será proporcional a la tensión suministrada por la termopila, teniendo en cuenta la tensión de referencia en el terminal negativo de la misma y el offset proporcionado por el operacional.

$$V_{termopila} = \left[ \left( 1 + \frac{R_5}{R_4} \right) \cdot V_{tp}(T^a) \right] + [V_{Ref}] - \left[ V_{offset} \cdot \left( 1 + \frac{R_5}{R_4} \right) \right] \quad [11]$$

Donde  $V_{tp}$  se corresponde con la diferencia de tensión presentada entre terminales de la termopila antes de ser amplificada,  $V_{Ref}$  recibe el valor de  $2\text{V}$  proporcionado por el divisor de tensión y  $V_{offset}$  con la tensión de offset proporcionada por el amplificador, despreciando la deriva del mismo debido a su reducido valor.

De esta manera, si despejamos el valor de la tensión en terminales de la termopila y sustituimos los respectivos valores en la ecuación [11], obtenemos la siguiente expresión del valor de tensión proporcionado entre los terminales de la termopila, correspondiéndose  $V_{OFFSET}$  con el valor de tensión de offset a la salida del operacional.

$$V_{tp} = \frac{V_{termopila} - 2V + V_{OFFSET}}{1001 \text{ V/V}} \quad [12]$$

Si sustituimos esta expresión en [6] y considerando el valor de temperatura ambiente [8], obtenemos el valor de temperatura a la cual se encuentra el objeto en °C, teniendo en cuenta que 0K se corresponde con 273.15°C.

$$T_{obj}(^{\circ}\text{C}) = \left[ \sqrt[4]{\frac{V_{termopila}(V) - 2 + V_{OFFSET}}{1001 \cdot K \cdot \varepsilon}} + T_{amb}^4(K) \right] - 273.15 \quad [13]$$

El valor de la constante  $K$  o sensibilidad del dispositivo se sitúa entre un margen de  $1 \times 10^{-13}$  y  $2 \times 10^{-13}$  V/K<sup>4</sup>. Este valor se determina a partir de la tensión proporcionada por la termopila para una temperatura del objeto de medida conocida, por lo que se precisa la ayuda de un segundo sensor que nos proporcione este valor real de temperatura. Esta operación de calibración del dispositivo se muestra más adelante.

### 4.2.3 Circuito de alimentación

La alimentación de todo el sistema se realiza a 5V, teniendo un consumo de 3.3mA. Para garantizar esta alimentación se ha escogido un regulador de tensión, modelo LP2980IM5-5 [DCLP], capaz de cumplir con nuestras especificaciones. Éste proporciona una corriente máxima de 50mA, y una tensión de salida de 5V para una diferencia de tensión mínima entre entrada y salida de 60mV, cuya tensión máxima de entrada es de 16V. Para su configuración, sólo se requiere a la salida un condensador de 3.3µF de Tántalo.

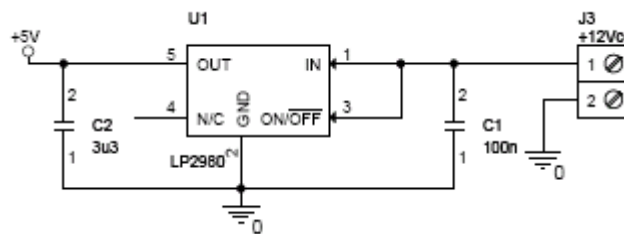


Figura 12. Circuito de alimentación.

## 4.3 Diseño de placa PCB

En el diseño de la placa del sensor se deberá tener en cuenta diferentes aspectos como son la compacidad del sistema y la facilidad a la hora de manejar las señales necesarias. También habrá que estudiar la fijación de algunos componentes para que su instalación sea de tipo *plug and play*, ya que esto permitirá una mayor flexibilidad del sensor.

La disposición de la termopila en nuestro sistema es de vital importancia, dado a que ésta debe de situarse de manera accesible a la radiación incidente del objeto de medida, para que estos rayos incidan sobre el área de visión activa de la termopila. Además, se debe de tener en cuenta la incorporación de una lente al sistema de manera que ésta quede centrada y paralela al área de visión mencionada. La descripción y motivo de esta lente será contemplado en el apartado de calibración y adecuación del sistema óptico.

Para conseguir alcanzar estos requerimientos se optó por el uso de un tubo óptico del fabricante *Thorlabs* [TH1L]. Consiste en un tubo fabricado en aluminio de 30.5mm de diámetro y una longitud de 54.6mm, el cual posee un roscado interior permitiendo la fijación de la placa y de la óptica asociada. Basta con insertar una arandela roscada [TH1R] en el interior del tubo a la distancia deseada, posteriormente la placa o lente y finalmente una segunda arandela roscada que fije al conjunto.



Figura 13. Soporte y fijador del dispositivo.

Conocido el soporte mecánico de nuestro dispositivo, procedemos a realizar el diseño de la placa, ajustándose a las características del mismo. Por ello, la placa debe de tener sección circular de 25.4mm de diámetro para poder adaptarse al interior del tubo. Dadas sus reducidas dimensiones, todos los componentes electrónicos que forman el circuito se han elegido de montaje superficial.

El diseño del circuito impreso de la placa, PCB (Printed Circuit Board), se ha realizado a través del software de diseño de circuitos electrónicos *OrCAD*, de la compañía *Cadence* [CAOR], a través de las herramientas *Capture Cis* y *Layout Plus*. Mención especial cobra la termopila en este programa que se tuvo que diseñar una huella específica con la herramienta *Library Manager*.

Los archivos pertenecientes al diseño de la placa se adjuntan en el Anexo 1. En estos archivos se podrá observar detalladamente la disposición de la termopila y componentes electrónicos en la placa. A continuación puede observarse el aspecto final de la placa diseñada en la siguiente figura.

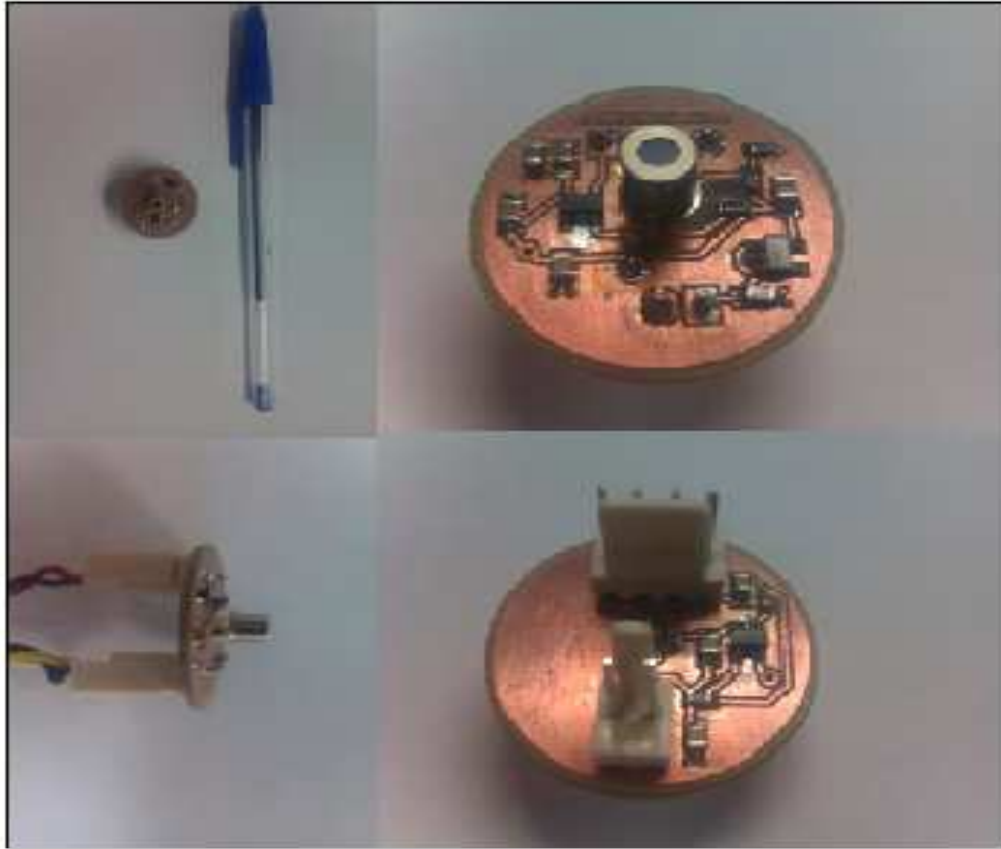


Figura 14. Placa PCB del sensor.

En esta figura se observa el aspecto final de la placa PCB. La parte superior de la imagen presenta la cara superior de la placa, donde se encuentra la termopila, el circuito acondicionador asociado a la misma y el circuito de alimentación, apreciándose sus reducidas dimensiones tomando como referencia un simple bolígrafo. En la parte inferior derecha muestra la cara inferior de la placa, donde se encuentra situado el circuito acondicionador del termistor y los bloques terminales de la PCB.

## 4.4 Calibración del sistema

Diseñado todo el sistema se procede a la calibración del mismo, mediante el ajuste de los circuitos de termistor y termopila, y la óptica asociada que nos permitirá un mayor alcance de visión para una misma área. Para ello, es necesario disponer de un sensor de referencia capaz de proporcionarnos la temperatura ambiente a la que se encuentra el sistema y la temperatura del objeto de medida, con el fin de verificar mediciones y obtener la sensibilidad exacta del dispositivo. Además, para ajustar el termistor o someter al material de medición a ciertas temperaturas será preciso el uso de una cámara climática con temperatura programable. A continuación se detallan los elementos esenciales para llevar a cabo la calibración de nuestro sistema.

### 4.4.1 Equipos auxiliares empleados

#### 4.4.1.1 Sensor de referencia

Como sensor de referencia, se ha optado por el modelo CS LT del fabricante *Optris* [OPCS]. Sensor de temperatura remoto basado en la captación de radiación infrarroja, capaz de facilitar temperatura ambiente y de objeto, para una emisividad dada. Tiene unas dimensiones de: M12 x 87mm de longitud y carcasa de acero inoxidable. Su rango de temperatura oscila de -40 a 1030°C, con un rango espectral comprendido de 8 a 14  $\mu\text{m}$ . Posee óptica de silicio reforzada y puede trabajar en un entorno con una temperatura máxima de 80°C sin refrigeración adicional. Además posee un error de temperatura de medición de  $\pm 1.5\%$ , para una temperatura ambiente de  $23 \pm 5^\circ\text{C}$ , con una repetitividad de  $\pm 0.75$ , tomados ambos valores con respecto a la temperatura.



Figura 15. Circuito acondicionador de la termopila.

También dispone de un sensor interno, concretamente un sensor resistivo Pt1000, capaz de recoger la temperatura ambiente a la que se encuentra el sensor en todo momento. Mediante un interfaz USB y con un software de control, proporcionado con el sensor, se realiza toda la recopilación y procesamiento de datos. Además nos va a permitir realizar medidas a una distancia relativamente grande, ya que dispone de una resolución óptica D:S de 15:1.

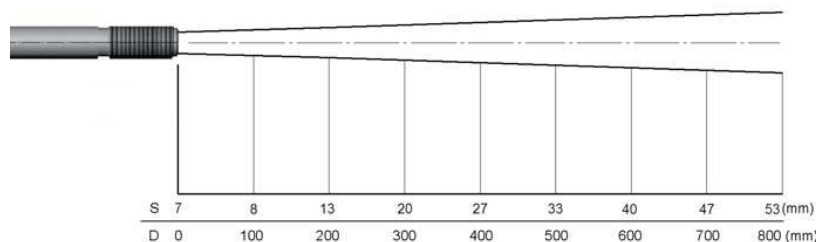


Figura 16. Especificaciones ópticas D:S = 15:1.

### 4.4.1.2 Cámara climática

Para la ejecución de las pruebas se utilizó una cámara climática programable para ensayos de temperatura y humedad. Se trata del modelo CCK -40/180 del fabricante *DYCOMETAL* [DYCO]DYCO, albergando un rango de temperaturas de -40 a 180°C y un rango de humedad relativa comprendido entre el 15 y el 98%. Ésta presenta una homogeneidad de la temperatura de  $\pm 1^\circ\text{C}/\text{min}$  en refrigeración y de  $\pm 2^\circ\text{C}/\text{min}$  en calefacción. Posee unas dimensiones interiores de 600mm de ancho, por otros 600 mm de alto y con 500mm de profundidad, incorporando dos rejillas para la sujeción de elementos, regulables en altura a través de unos soportes.



Figura 17. Cámara climática CCK -40/180.

Para el control de todo el funcionamiento de la cámara se utiliza el controlador multibucle *EUROTHERM 2604* [EUR], el cual posee dos bucles de control que se han dedicado para el control de la temperatura y de humedad relativa respectivamente. Éste se programa con la utilización de segmentos que establecen unos valores de temperatura y humedad durante un tiempo prefijado, permitiendo almacenar hasta 50 programas con un máximo de 500 segmentos.

Existen tres tipos de segmentos, el tipo *Profile* correspondiente a un segmento básico u ordinario, el tipo *End Segment* con el que se finaliza el programa y por último el segmento *Go Back*, que permite saltar, dentro del mismo programa, a otros segmentos un número de veces requerido por el usuario.

En nuestro caso, se han realizado dos sencillos programas para la calibración de los circuitos acondicionadores de termistor y termopila. El primero ha sido programado para realizar un barrido de temperaturas de -25 a 35°C, con el fin de someter al termistor al intervalo de temperaturas de trabajo y evaluar sus resultados. En la tabla siguiente se detalla el programa.

Nº Segmento	Tipo Segmento	Punto Consigna	Duración (min.)
1	<i>Profile</i>	-25°/15%HR	70
2	<i>Profile</i>	-25°/15%HR	2
3	<i>Profile</i>	35°/15%HR	110
4	<i>End Segment</i>	35°/15%HR	--

Tabla 3. Programa de la cámara climática para ajuste de termistor.

Para la calibración de la termopila fue desarrollado un segundo programa con el que el material de medida era sometido a una temperatura de -25°C, durante un tiempo suficiente para garantizar que el material se encuentre a la misma. Posteriormente, el

material era retirado de la cámara climática situándolo a temperatura ambiente en un soporte frente a los sensores de medición hasta el alcance de la misma, con el fin de obtener la temperatura del mismo a lo largo de nuestro intervalo de trabajo, ya que tanto el material de medida como la totalidad del sistema se encontraban a temperatura ambiente. De esta forma conseguimos el valor de la temperatura del objeto y el valor de tensión proporcionado por la termopila desde  $-20^{\circ}\text{C}$  hasta una temperatura ambiente situada en torno a los  $25^{\circ}\text{C}$ , cubriendo nuestro rango de trabajo.

### 4.4.1.3 Fuente de radiación infrarroja

Para la realización de las diferentes mediciones se ha empleado como objeto de medida un fragmento de asfalto, extraído de una carretera. Éste posee un área aproximado de  $240 \times 200 \text{ mm}^2$ . La emisividad de este material se corresponde con un valor de 0.967 [OPT], valor verificado con diferentes medidas realizadas con el sensor de referencia mencionado anteriormente.



Figura 18. Muestra de asfalto de carretera.

Este material se va a emplear en todo momento para la calibración del nuestro sensor y la realización de las respectivas medidas que verifiquen su funcionamiento.

### 4.4.1.4 Sistema de adquisición de datos

Todo sistema sensorial ha de disponer de un sistema de adquisición de datos para poder analizar posteriormente los mismos. Nuestro sensor realizará esta tarea mediante una tarjeta destinada a este fin, tarjeta de adquisición de datos *miniLAB 1008* y un software de control encargado de procesar, mostrar y almacenar los datos obtenidos.

- **Tarjeta de adquisición de datos.**

Los datos del sistema se recogerán con la tarjeta de adquisición de datos *miniLAB 1008*. Esta tarjeta nos permitirá monitorizar completamente las temperaturas proporcionadas por el sistema, ya que está formada por ocho entradas analógicas de 1.2kS/s, con un rango entre  $\pm 10 \text{ V}$  y 11 bits de resolución, y dos salidas analógicas de 100S/s, con un rango entre 0 y 5 V y 10 bits de resolución.





Figura 19. Tarjeta de adquisición de datos *miniLAB 1008*.

Ésta será conectada directamente al ordenador mediante el puerto USB, usando los dos primeros canales, para la recogida de la tensión proporcionada por el circuito acondicionador de la termopila y la tensión correspondiente al termistor, estando configurados estos canales como entradas analógicas.

- **Software de almacenamiento de datos.**

El procesamiento de datos se realiza a través de un programa desarrollado en *LabVIEW*, permitiéndonos el almacenamiento de los valores de tensión de termopila y termistor en un fichero.

*LabVIEW* se trata de una excelente herramienta gráfica para sistemas de medida, test y control, creada por *National* [NAIN], basado en una programación gráfica o lenguaje G. Todo se desarrolla en un entorno gráfico, permitiéndonos una gran facilidad de programación. Además, *LabVIEW* permite combinarse con todo tipo de software y hardware, entre ellos la tarjeta de adquisición de datos *miniLab 1008* empleada.

Como mencionamos anteriormente, la tensión de salida proporcional a la temperatura del objeto y a la temperatura ambiente son los datos fundamentales del sistema. Éstos se almacenarán en un archivo cada cierto tiempo que dependerá del tiempo de muestreo impuesto, siendo éste de un segundo.

#### 4.4.2 Ajuste de termistor

Los parámetros de referencia suministrados por el fabricante para el cálculo de temperatura ambiente mediante el termistor se corresponden con un valor de resistencia  $R_0$  de  $100\text{k}\Omega$  para una temperatura  $T_0$  de  $25^\circ\text{C}$ , y un valor de constante de temperatura del material del mismo  $\beta$  de  $3940\text{K}$ , para un intervalo de temperaturas comprendido entre  $25$  y  $50^\circ\text{C}$ .

Dado que estos valores suministrados por el fabricante son proporcionados para una temperatura ambiente de  $25^\circ\text{C}$ , y éstos pueden variar ligeramente según la temperatura de servicio, serán calculados de nuevo dentro de nuestro rango de trabajo, en un intervalo de  $-20$  a  $30^\circ\text{C}$ .

En primer lugar, se calcula un nuevo valor de resistencia de referencia del termistor para una temperatura media de nuestro intervalo de trabajo. Se ha escogido  $1.5^\circ\text{C}$  como temperatura media, obteniendo un valor de  $300\text{k}\Omega$  para  $R_0$ , tras someter al sistema a dicha temperatura en el interior de la cámara climática, durante 60 minutos aproximadamente.



Para el cálculo de la constante  $\beta$ , despejamos el mismo de [8] obteniendo la siguiente expresión:

$$\beta = \frac{\ln \frac{R_{th}}{R_0}}{\frac{1}{T_{ambiente}} - \frac{1}{T_0}} \quad [14]$$

Donde la temperatura ambiente se obtiene por medio del sensor de referencia CS LT, los valores de  $R_0$  y  $T_0$  han sido calculados anteriormente, y el valor de  $R_{th}$  se obtiene mediante la expresión [10], a partir de la tensión proporcionada por el circuito acondicionador del termistor.

Para ello, se introduce la totalidad del sistema en el interior de la cámara climática, donde es sometido a un barrido de temperaturas comprendido dentro de nuestro intervalo de trabajo, obteniendo los siguientes resultados.

$T_{amb.}$ CS LT (°C)	$V_{termistor}$ (V)	$R_{th}$ (kΩ)
-20	3,93	992,47
-15	3,72	786,61
-10	3,45	601,26
-5	3,13	450,63
0	2,80	344,40
5	2,44	257,97
10	2,14	202,08
15	1,85	158,87
20	1,58	124,78
25	1,35	100,12
30	1,15	80,65

Tabla 4. Resistencia del termistor en función de la temperatura.

A partir de estos datos podemos obtener el nuevo valor de la constante  $\beta$  mediante la expresión obtenida anteriormente [14] y los valores de referencia calculados, tomando  $R_0$  un valor de 300kΩ para una temperatura de 1.5°C.

Se calcula diferentes valores de  $\beta$  para un rango de temperaturas comprendido en el punto medio del intervalo de operación, es decir, entre 0 y 10°C. Finalmente, tras la realización de un promediado de estos valores obtenemos un valor de  $\beta$  de 3738K.

	$\beta$ (K)	$R_0$ (kΩ)	$T_0$ (°C)
Suministrados por fabricante	3940 (25,50°C)	100	25
Calculados	3738 (0, 10°C)	300	1.5

Tabla 5. Comparativa de parámetros fabricante vs medidos

Obtenidos los nuevos parámetros nos disponemos a calcular la temperatura ambiente a partir de la resistencia del termistor y la expresión [8], con la finalidad de observar el error o las diferencias de usar unos parámetros u otros con respecto al sensor de referencia, y seleccionar para nuestro dispositivo aquellos que sean más adecuados.

			$\beta = 3940K$ $R_0 = 100k\Omega @ 25^\circ C$	$\beta = 3738K$ $R_0 = 300k\Omega @ 1.5^\circ C$
$T_{amb}^{CS LT} (^{\circ}C)$	$V_{termistor} (V)$	$R_{th} (k\Omega)$	$T_{Termistor}^{a} (^{\circ}C)$	$T_{Termistor}^{a} (^{\circ}C)$
-20	3,93	992,47	-19,12	-20,69
-15	3,72	786,61	-15,25	-16,67
-10	3,45	601,26	-10,64	-11,85
-5	3,13	450,63	-5,49	-6,47
0	2,80	344,40	-0,51	-1,26
5	2,44	257,97	5,05	4,58
10	2,14	202,08	9,93	9,71
15	1,85	158,87	14,91	14,96
20	1,58	124,78	20,09	20,42
25	1,35	100,12	24,97	25,59
30	1,15	80,65	29,93	30,84

Tabla 6. Temperatura ambiente en función de distintos parámetros.

A la vista de los resultados obtenidos nos decantamos por los parámetros suministrados por el fabricante, ya que éstos difieren menos con respecto al sensor de referencia, encontrándose una diferencia máxima de  $0.8^\circ C$  para una temperatura mínima de  $-20^\circ C$ , mientras que con los parámetros calculados esta diferencia asciende a un valor de  $1.8^\circ C$  para bajas temperaturas.

Analizando estos datos, obtenemos que el termistor muestra una precisión mínima de  $0.8^\circ C$  para una temperatura límite de  $-20^\circ C$ . Este valor es demasiado elevado debido a que nos encontramos en el límite de funcionamiento de la termopila, ya que a medida que aumenta la temperatura disminuye este valor alcanzando una precisión máxima  $0.03^\circ C$ .

Llegado a este punto, podemos obtener la temperatura ambiente a la que se encuentra nuestro dispositivo, con una precisión mínima de  $0.8^\circ C$ , por medio de la expresiones [8] y [10], la tensión suministrada por el circuito acondicionador del termistor y los parámetros proporcionados por el fabricante, siendo  $R_0$  de  $100k\Omega$  para una temperatura  $T_0$  de  $25^\circ C$  y un valor de  $\beta$  de  $3940K$ .

#### 4.4.3 Calibración óptica

La termopila posee un campo de visión de  $34^\circ @ 5\%$ , es decir, con un ángulo de visión de  $\pm 17^\circ$  la termopila capta un 95% de la radiación incidente, siendo el 5% restante despreciable.

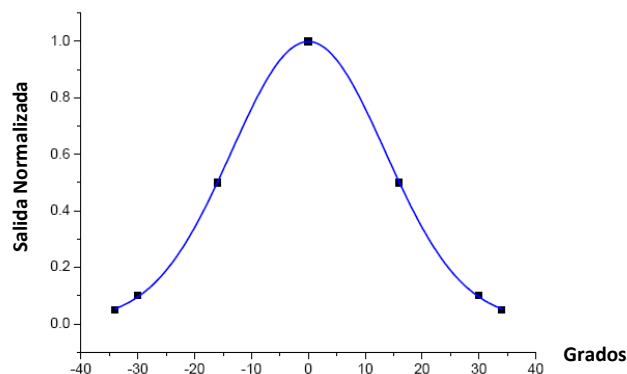


Figura 20. Campo de visión de la termopila.

Dado que uno de nuestros objetivos reside en que la distancia de medición debe de ser máxima, será necesario agregar al sistema una lente adicional a la incorporada en la termopila. Este tipo de lente necesariamente debe de ser convexa, para permitir concentrar toda la radiación perpendicular a la lente en un mismo punto, punto focal, de forma que éste se encuentre situado en la región de visión de la termopila.

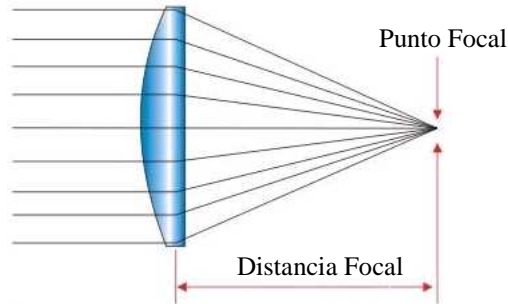


Figura 21. Esquema de lente plano-convexa.

También es posible el uso de lentes de Fresnel, caracterizadas por tener una gran apertura de visión con una reducida distancia focal, además de presentar un bajo coste y peso. Podemos destacar en estas lentes al fabricante *Memstech* [MEMS] y a *Roithner Laser Techink* [RLTL]. Estas lentes presentan una gran complejidad de ajuste, ya que la distancia focal es muy reducida, por lo que finalmente se ha optado por el uso de una lente plano-convexa.

Se ha seleccionado una lente de Germanio del fabricante *Thorlabs*, modelo LA9509-F [THLA], ya que se ajusta adecuadamente a la apertura de visión de la termopila y cuya región de trabajo se sitúa entre 8 y 12  $\mu\text{m}$ , satisfaciendo nuestras necesidades. Esta lente tiene un diámetro y una distancia focal de 25.4mm.

Para ajustar la lente a nuestro dispositivo debemos calcular la distancia D para la cual se consigue adaptar la apertura de visión de la termopila a la lente, permitiendo la captación de toda la energía que incide perpendicularmente sobre la misma.

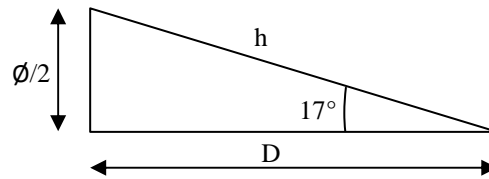


Figura 22. Cálculo de la distancia de adaptación de la lente.

Si cogemos la mitad de la apertura de visión de la termopila, 17°, podemos calcular la distancia D a la cual hay que situar la lente mediante unos sencillos cálculos.

$$\sin 17^\circ = \frac{\varnothing}{2 \cdot h} = \frac{25.4}{2 \cdot h} \Rightarrow h = 43.43\text{mm}$$

$$\cos 17^\circ = \frac{D}{h} \Rightarrow D = 41.54\text{mm}$$

La lente debe de estar situada a una distancia de 41.54mm, con respecto al área activa de visión de la termopila.

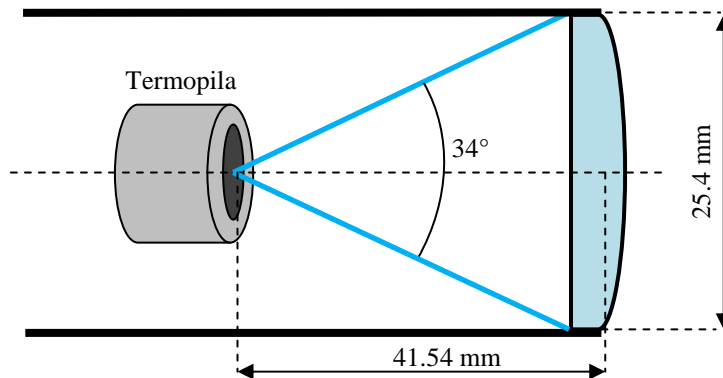


Figura 23. Incorporación de una lente de 25.4mm de diámetro y distancia focal.

Esta distancia  $D$  de 41.54mm debe ser ajustada de forma precisa, con un margen de error mínimo, ya que de no ser así parte del área de visión de la termopila quedaría fuera de la lente captando un cierto porcentaje de radiación procedente del soporte mecánico.

Dado que el soporte mecánico de nuestro dispositivo se trata de un elemento metálico cilíndrico de 25.4mm de diámetro y con roscado interior, la lente se ajusta adecuadamente por medio de dos arandelas roscadas del mismo diámetro, con sus respectivas arandelas que evitan posibles daños en la lente a la hora de su fijación.

Fijada la lente al dispositivo, se obtiene un sistema con una resolución óptica D:S de 10:1. Esto quiere decir que si el dispositivo se encuentra a una distancia de 100mm del objeto de medida, éste recibirá toda la radiación que incide en la lente procedente de un área de sección circular de 10mm de diámetro de dicho objeto.

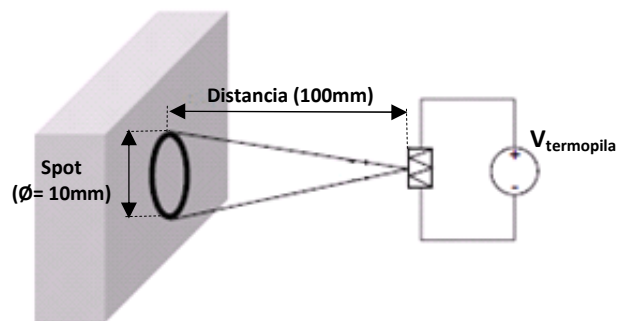


Figura 24. Relación óptica D:S del sensor.

Esta relación fue medida fijando el sensor a una distancia conocida con respecto a una base o plataforma, enfocado perpendicularmente a la misma. El spot o área de visión del sensor ha sido determinada al pasar un objeto sometido a una elevada temperatura sobre una superficie base. Al existir una gran diferencia de temperatura entre objeto y base, el área queda delimitada al pasar cuidadosamente el objeto sobre dicha base, marcando la trayectoria del área a medida que el dispositivo capta la elevada diferencia de temperaturas existente entre objeto y base.

El área de visión es determinada sin problemas al existir gran diferencia de temperatura entre la base y el objeto de medida empleado, de manera que conocido el

diámetro de esta área y la distancia de medida obtenemos el valor de la resolución óptica de nuestro sensor, 1:10.

#### 4.4.4 Ajuste de termopila

El primer paso a llevar a cabo en el ajuste del circuito acondicionador de la termopila consiste en el cálculo de offset originado a la salida el mismo. Para su cálculo, se requiere que todo el sistema se encuentre en equilibrio térmico, de forma que la tensión proporcionada por la termopila sea 0V, debido a que la temperatura del objeto de medida captada por la termopila coincide con la temperatura ambiente a la que se encuentra el dispositivo en ese instante [5].

Para ello, se introduce tanto el sistema como el objeto de medida en el interior de la cámara climática, programándose una temperatura constante durante un largo periodo de tiempo, de forma que tanto el sistema como el objeto de medida se encuentren a la misma temperatura.

Esta medida se desarrolla a una temperatura constante de 2.8°C, obteniendo un valor de 2.0356V a la salida del circuito acondicionador de la termopila, con una desviación de  $\pm 41\text{mV}$ . Si consideramos una tensión de referencia de 2V precisos en el terminal negativo de la termopila [11], obtenemos un offset en el circuito de 35.6mV. Esta tensión de referencia no es exacta, debido a la tolerancia de las resistencias, por lo que una parte de este offset se debe la incertidumbre del valor referencia de 2V, considerando el restante al proporcionado por el amplificador operacional.

Para la realización de las diferentes medidas, siempre se debe de tener en cuenta este valor de offset en la tensión de salida del circuito acondicionador de la termopila [12]. De esta forma obtenemos el verdadero valor de tensión suministrado en terminales de la termopila.

Finalmente, para terminar la calibración del sistema nos queda por determinar el valor de la constante  $K$ , o sensibilidad del dispositivo. Despejando el valor de esta constante de [6] se obtiene la expresión mostrada a continuación.

$$K = \frac{V_{tp}}{\varepsilon \cdot (T_{obj}^4 - T_{amb}^4)} \quad [15]$$

Para su cálculo se precisa conocer la temperatura del objeto de medición en función de la tensión proporcionada por la termopila, para una temperatura ambiente constante. La temperatura del objeto será recogida por el sensor de referencia CS LT, al mismo tiempo que se almacenan los diferentes valores de tensión de la termopila en función de dicha temperatura. De esta forma obtenemos los valores que se muestran a continuación para una temperatura ambiente constante de 25.5°C, registrada por el termistor y sensor de referencia CS LT.

$T_{\text{obj}} \text{ CS LT } (^{\circ}\text{C})$	$V_{\text{tp}} \text{ (mV)}$	$K \text{ (V/K}^4\text{)}$
-20	-0.564	$1,55 \times 10^{-13}$
-15	-0.525	$1,58 \times 10^{-13}$
-10	-0.467	$1,56 \times 10^{-13}$
-5	-0.418	$1,59 \times 10^{-13}$
0	-0.359	$1,60 \times 10^{-13}$
5	-0.291	$1,59 \times 10^{-13}$
10	-0.223	$1,58 \times 10^{-13}$
15	-0.154	$1,61 \times 10^{-13}$
20	-0.076	$1,59 \times 10^{-13}$

Tabla 7.  $V_{\text{tp}}$  en función de la temperatura del objeto.

Para cada temperatura se obtiene su valor correspondiente de constante  $K$  a partir de la expresión anterior [15], obteniendo una serie de valores que varían entre  $1,55 \times 10^{-13}$  y  $1,61 \times 10^{-13} \text{ V/K}^4$ , escogiendo como valor de constante  $K$  o sensibilidad del dispositivo un valor medio de dicho intervalo,  $1,57 \times 10^{-13} \text{ V/K}^4$ . Si calculamos la temperatura del objeto para las diferentes constantes, obtenemos el mayor ajuste de temperatura con este valor, correspondiéndose con uno de los valores medios de este intervalo.

$K \text{ (V/K}^4\text{)}$		$1,55 \times 10^{-13}$	$1,56 \times 10^{-13}$	$1,57 \times 10^{-13}$	$1,58 \times 10^{-13}$	$1,59 \times 10^{-13}$
$T_{\text{Obj. CS LT}} (^{\circ}\text{C})$	$V_{\text{tp}} \text{ (mV)}$	$T_{\text{obj}} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{obj}} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{obj}} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{obj}} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{obj}} (^{\circ}\text{C})$
-20	-0,564	-19,65	-19,27	-18,90	-18,54	-18,18
-15	-0,525	-15,67	-15,34	-15,01	-14,69	-14,37
-10	-0,467	-10,25	-9,97	-9,70	-9,43	-9,16
-5	-0,418	-5,54	-5,31	-5,07	-4,84	-4,62
0	-0,359	-0,55	-0,35	-0,16	0,02	0,21
5	-0,291	5,01	5,16	5,30	5,45	5,59
10	-0,223	10,30	10,40	10,51	10,61	10,71
15	-0,154	15,22	15,29	15,36	15,43	15,49
20	-0,076	20,60	20,63	20,66	20,70	20,73

Tabla 8.  $T_{\text{Obj}}$  en función de la sensibilidad  $K$  para  $T_{\text{Amb}}$  constante de  $25.5^{\circ}\text{C}$ .

Con este valor de sensibilidad se obtiene una incertidumbre máxima de  $0.75^{\circ}\text{C}$  para una temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$ , disminuyendo ésta hasta un valor de  $0.03^{\circ}\text{C}$  para una temperatura máxima de  $20^{\circ}\text{C}$ .

Si analizamos los valores obtenidos con respecto al sensor tomado como referencia, nos encontramos con una precisión mínima de  $1.1^{\circ}\text{C}$  para una temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$ , con temperatura ambiente constante de  $25.5^{\circ}\text{C}$ . Este valor de precisión aumenta significativamente a medida que disminuye la diferencia comprendida entre la temperatura del objeto y ambiente.

Por otro lado, ha sido analizada la repetitividad del sistema, sometiendo al mismo a varias mediciones sobre el mismo material, manteniendo siempre las mismas condiciones de trabajo, es decir, se ha obtenido el error que presenta el dispositivo al realizar una serie de medidas en diferentes intervalos de tiempo, para un mismo material, manteniendo la distancia de medición, temperatura del objeto y temperatura ambiente, siendo de  $0.5^{\circ}\text{C}$ .

Con el cálculo de esta constante o sensibilidad del dispositivo se disponen de todos los datos necesarios para el cálculo de la temperatura del material de medición.

## 4.5 Conclusiones

Este capítulo ha sido fundamental para la consecución del proyecto, ya que aquí se han ido desarrollando todas las características que debe aunar nuestro sensor, verificando cada una de ellas con respecto al sensor utilizado como referencia.

A continuación se detallan las características del sensor de temperatura remoto diseñado, al que denominaremos a partir de este momento Sensor de Temperatura-IR.

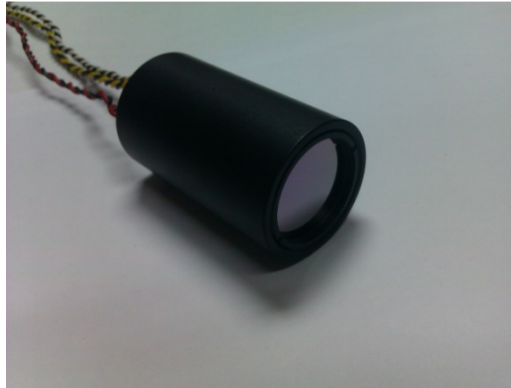


Figura 25.Sensor de Temperatura-IR.

Especificaciones generales:

- Rango de temperatura del objeto: -20 a 20°C.
- Rango de temperatura ambiente: -20 a 30°C.
- Peso: 35 gramos.
- Dimensiones: 30.5mm de diámetro y 54.6mm de longitud.

Especificaciones eléctricas:

- Alimentación comprendida entre 5.3 y 16V DC.
- Consumo de corriente medio de 3.3mA.
- Salida analógica:
  - ✓  $V_{\text{termopila}}$ : 1 a 3V (-20 a 20°C).
  - ✓  $V_{\text{termistor}}$ : 4 a 1V (-20 a 30°C).

Especificaciones de medición:

- Intervalo de temperatura de medición: -20 a 20°C.
- Relación óptica D:S de 10:1.
- Rango espectral: 8 a 12 $\mu\text{m}$ .
- Resolución: 0.3°C.
- Tiempo de respuesta: 0.2 segundos.
- Precisión mínima de temperatura ambiente: 0.8°C a -20°C.
- Precisión mínima de temperatura del objeto: 1.1°C a -20°C, con temperatura ambiente de 20 $\pm$ 5°C.
- Repetitividad: 0.5°C.

Mediante las expresiones [8] y [10] obtenemos la temperatura ambiente a la cual se encuentra el sistema en °C.

$$T_{amb}(^{\circ}\text{C}) = \left[ \frac{1}{\beta} \cdot \ln \frac{\left( \frac{270 \cdot 10^3}{5} \right)}{R_0} + \frac{1}{T_0(\text{K})} \right]^{-1} - 273.15 \quad [16]$$

Donde  $V_{\text{termistor}}$  es la tensión proporcionada por el circuito acondicionador del termistor, por medio del cable de color amarillo del sistema, variando entre 4 y 1V para un intervalo de temperaturas entre -20 y 30°C respectivamente. La constante  $\beta$  posee un valor de 3940K y  $R_0$  tiene un valor de 100k $\Omega$  para una temperatura  $T_0$  de 25°C (298.15K).

La temperatura del objeto se obtiene mediante la siguiente expresión, obtenida a partir de [14], teniendo en cuenta la tensión de offset de 35.6mV presentado por el circuito de acondicionamiento de la termopila.

$$T_{obj}(^{\circ}\text{C}) = \left[ \sqrt[4]{\frac{V_{\text{termopila}}(V) - 2.0356}{1001 \cdot 1.57 \times 10^{-13} \cdot \varepsilon}} + T_{amb}^4(\text{K}) \right] - 273.15 \quad [17]$$

Siendo  $V_{\text{termopila}}$  la tensión suministrada por el conductor de color blanco del sistema, proporcional a la temperatura del objeto, cuyos valores de tensión varían entre 1 y 3V para un rango de temperaturas entre -20 y 20°C respectivamente. El parámetro  $\varepsilon$  se corresponde con la emisividad del material de medida, variando entre 0.1 y 1.

Por lo tanto, podemos destacar que este capítulo de diseño del sensor de temperatura remoto ha sido resuelto de una manera satisfactoria que redundará en los resultados obtenidos y recogidos en el capítulo 5.



# Capítulo 5

## Medidas de funcionamiento

Desarrollado y calibrado nuestro sensor de temperatura remoto, nos disponemos a verificar su funcionamiento con respecto al sensor de referencia CS LT, mediante la evolución de la temperatura de tres fuentes de radiación diferentes, dentro de nuestro rango de temperaturas de trabajo, comprendido entre  $-20$  y  $20^{\circ}\text{C}$ .

En este capítulo se muestra el procedimiento que se ha seguido y los resultados obtenidos tras la calibración del sensor de Temperatura-IR diseñado, así como la verificación de su correcto funcionamiento. Para ello, se antoja necesaria la creación de un software de control a través del programa *LabVIEW*, que nos permita calcular, almacenar y visualizar a través de pantalla la temperatura del objeto de medición en todo momento, así como la temperatura ambiente. Además, este software permite al usuario modificar el tiempo de muestreo y emisividad de material.

Todas las pruebas se realizaron en el laboratorio del Grupo de Optoelectrónica y Tecnología Laser de UC3M, con sus respectivos equipos de medición mencionados en el primer capítulo.

## 5.1 Software de control

Acabado el diseño del sensor, nos dispondremos a desarrollar un programa realizado en *LabVIEW* que nos permita procesar la tensión suministrada por la termopila y termistor, traduciendo estos valores a temperatura.

El programa está formado por dos partes bien diferenciadas, el Panel Frontal y el Diagrama de Bloques. El Panel Frontal es el interfaz con el usuario, permitiendo a éste la visualización de los datos durante su ejecución. Por otro lado, el Diagrama de Bloques es el propio programa, es decir, en él se encuentran los iconos o bloques con distintas funcionalidades que interconectados entre ellos forman el propio programa en sí.

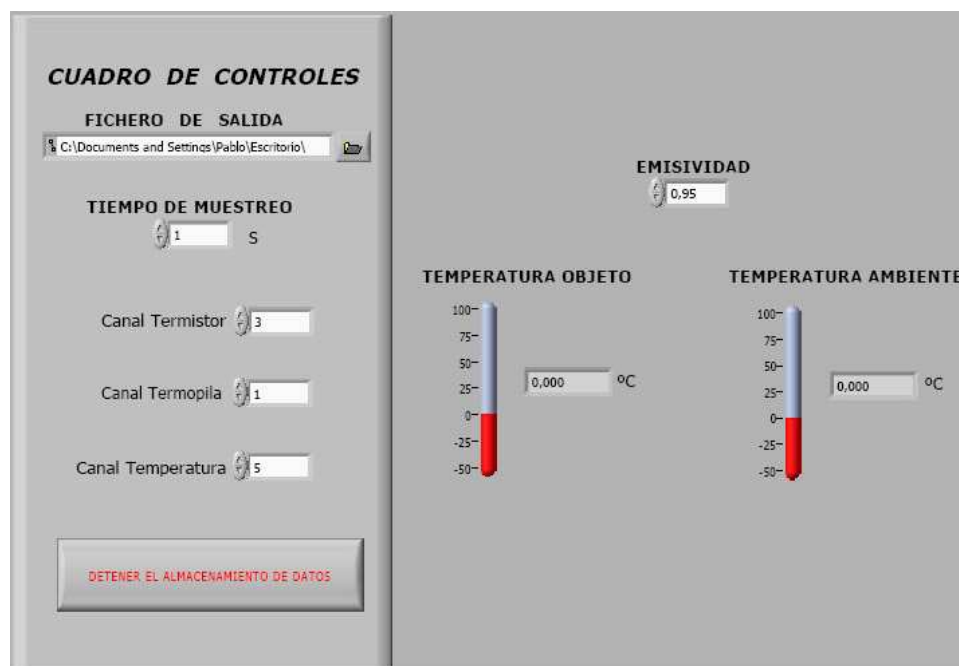


Figura 26. Panel frontal del programa de control.

El Panel Frontal posee dos indicadores, uno de ellos estará destinado a la visualización de la temperatura del objeto y un segundo muestra la temperatura ambiente a la que se encuentra el dispositivo. Además este panel permite al usuario cambiar la emisividad del material, así como pausar el programa, cambiar el tiempo de muestreo de los datos y modificar el fichero de salida de los mismos, durante la ejecución del programa.

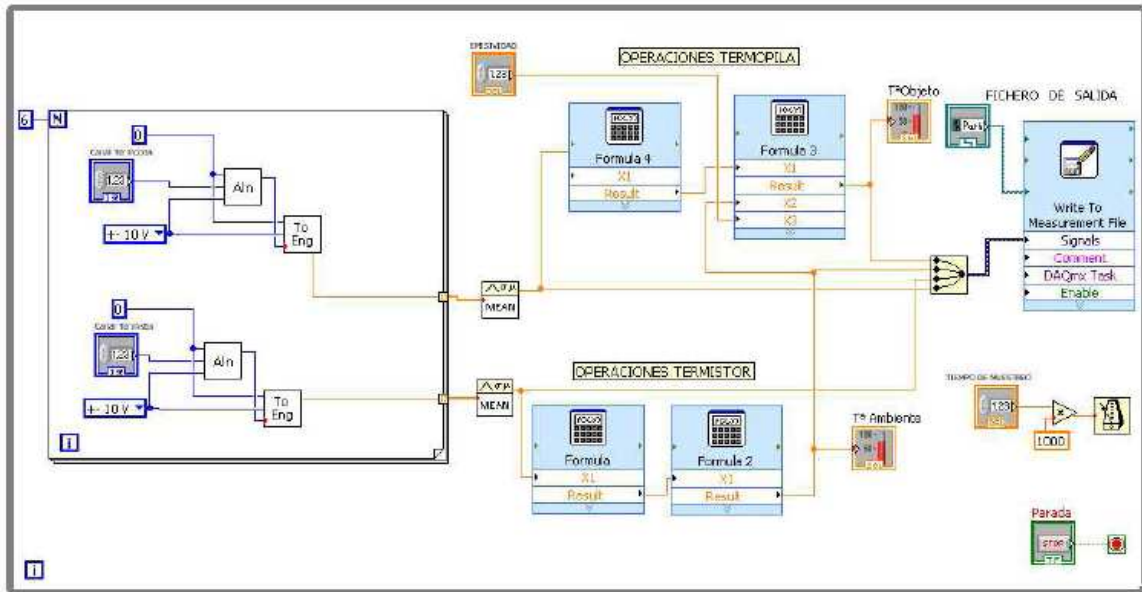


Figura 27. Diagrama de bloques del programa de control con uso de fórmulas.

En el Diagrama de Bloques se muestra la programación en sí. Todos los iconos o bloques se encuentran dentro de un bucle que recorre según el tiempo de muestreo programado por el usuario. Los iconos *Ain* tienen como función leer los valores de entrada de la tarjeta de adquisición, configurados mediante los valores numéricos que se encuentran a su izquierda, indicando el número de tarjeta usada, canal de la misma y el rango de la tensión de entrada. Seguido a este icono nos encontramos el bloque *ToEng*, encargado de transformar el valor leído de tensión para procesarlo y poder calcular la temperatura a través del bloque *Fórmula*, utilizando la expresión [17] para el cálculo de la temperatura del objeto, y la expresión [16] para temperatura ambiente. Finalmente, estos datos de temperatura son almacenados, por medio de *To Measurement File*, en un directorio.

Debido al alto coste computacional que requiere el cálculo de los valores a través de las ecuaciones, se diseñó un segundo programa con el uso de *lookup tables*.

Los valores de resistencia del termistor en función de la temperatura ambiente y los valores de tensiones de la termopila en función de la temperatura del objeto son almacenados en *lookup tables*. Con ello se consigue ahorrar tiempo de procesamiento, ya que sacar un valor de memoria es mucho más rápido que hacer una gran computación.

T <sub>ambiente</sub> (°C)	R <sub>th</sub> (kΩ)	T <sub>objeto</sub> (°C) @ 0°C	V <sub>tp</sub> (mV)
-20	921.2	-20	-0,2174
-15	690	-15	-0,1676
-10	524.48	-10	-0,1149
-5	404.34	-5	-0,0591
0	308.41	0	0
5	244.86	5	0,0624
10	189.27	10	0,1283
15	145.13	15	0,1978
20	111.87	20	0,2708
25	100.62		
30	80.65		

Tabla 9. *Lookup tables* de termistor y termopila.

Dado que los valores de ambas tablas se encuentran en intervalos de 5°C, será necesario interpolar para la obtención de valores intermedios. Además, cabe destacar que los valores de tensión de la termopila,  $V_{tp}$ , son calculados para una temperatura ambiente constante de 0°C en el dispositivo.

Para el cálculo de la temperatura ambiente a la que se encuentra el dispositivo, se adquiere el valor de tensión proporcionado por el circuito acondicionador del termistor,  $V_{termistor}$ , obteniendo el correspondiente valor de resistencia,  $R_{th}$ , mediante la expresión [10]. A partir de este valor de resistencia se obtiene el respectivo valor de temperatura ambiente por medio de la *lookup table*.

Por otro lado, se adquiere la tensión proporcionada por el circuito acondicionador de la termopila,  $V_{termopila}$ , y a partir de [13] se obtiene la tensión en la termopila,  $V_{tp}$ , obteniendo su respectivo valor de temperatura del objeto a través de la tabla. A este valor se le suma la temperatura ambiente obtenida anteriormente, quedando compensada la temperatura del objeto.

$$T_{objeto} = T_{obj}(lookuptable) + T_{ambiente} \quad [18]$$

Esta operación se debe a que la curva de valores de tensión de la termopila se desliza en función de la temperatura ambiente, cortando en el eje de abscisas cuando el valor de temperatura del objeto coincide con el de ambiente del dispositivo [5].

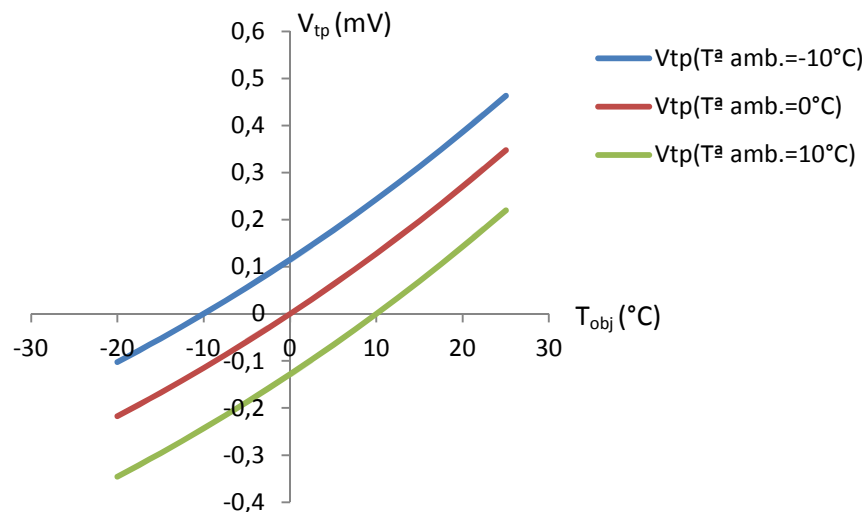


Figura 28. Variación de  $V_{tp}$  en función de  $T_{objeto}$ .

El Panel Frontal de este nuevo programa no ha sido modificado, permitiendo al usuario las mismas operaciones mencionadas anteriormente. Mientras que al Diagrama de Bloques se le ha incorporado ambas *lookup tables* y un bloque de interpolación polinómica para los datos de cada tabla.

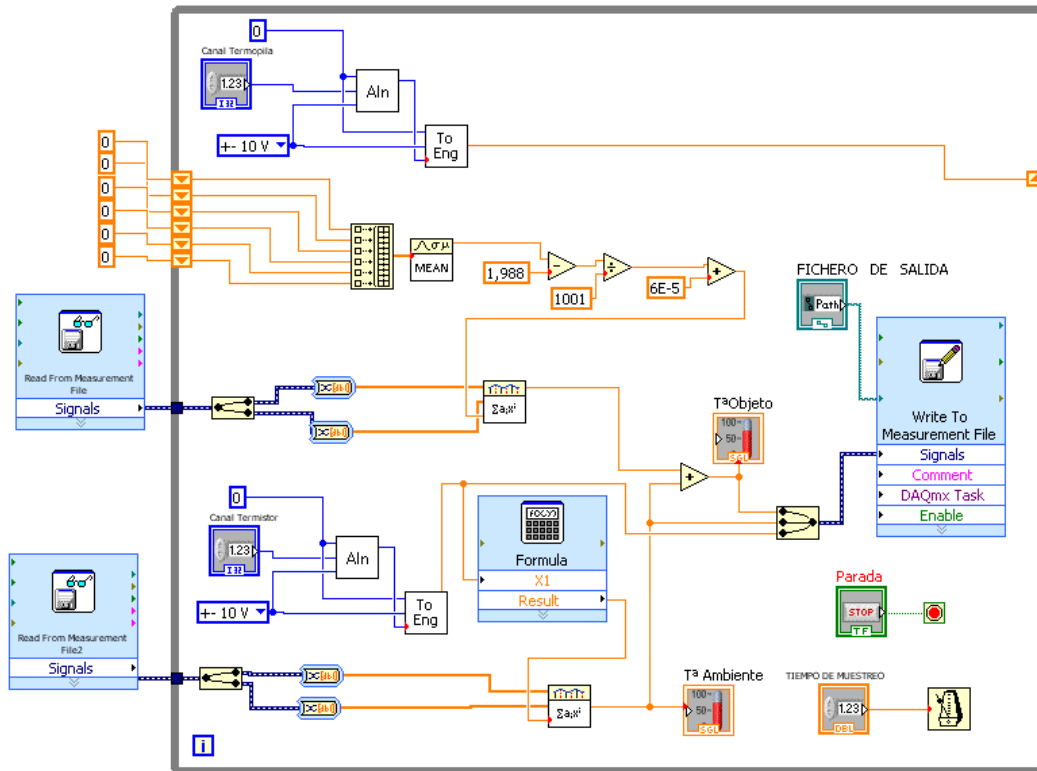


Figura 29. Diagrama de bloques del programa de control con uso de *lookup tables*.

Esta figura muestra el Diagrama de Bloques del programa de control con el uso de dos *lookup tables*, para termistor y termopila. Los datos son almacenados en tablas por medio de los bloques de la izquierda, de forma que éstos son interpolados cuando entran en el bucle obteniendo el valor correspondiente de resistencia o tensión en la termopila. Finalmente, se cogen sus respectivos valores de temperatura, como se ha explicado anteriormente, para mostrarlos y almacenarlos en un fichero.

## 5.2 Descripción del procedimiento seguido en los experimentos

Para llevar a cabo las medidas, fue situado el sensor de Temperatura-IR a la misma altura que el sensor de referencia CS LT por medio de un soporte mecánico, distanciados ambos por 10mm, con la finalidad de que ambos se encuentren en las mismas condiciones de servicio.

El objeto de medición era sometido a una temperatura de  $-25^{\circ}\text{C}$  en la cámara climática durante un tiempo aproximado de 150 minutos, tiempo más que suficiente para que el objeto de medida se encuentre a dicha temperatura. Posteriormente, el material era expuesto ante los sensores hasta alcanzar la temperatura ambiente a la que se encuentran los mismos. El material de medición era situado a una distancia de medida fija durante la toma de datos de temperatura.

## 5.2 Descripción del procedimiento seguido en los experimentos

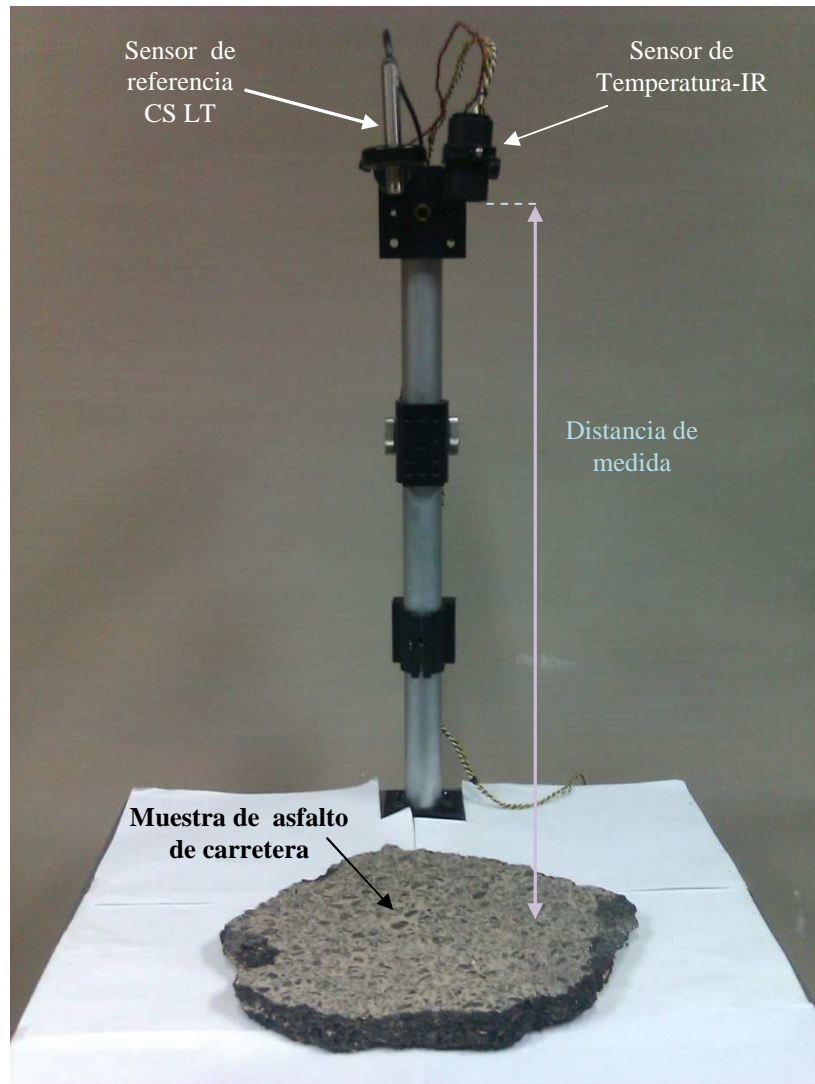


Figura 30. Disposición de los elementos durante el desarrollo las medidas.

Ambos sensores permanecían a temperatura ambiente constante, de forma que la distancia de separación del objeto debería ser lo suficientemente grande como para que los sensores encargados de recoger la temperatura ambiente no se vieran afectados por la baja temperatura del material durante la ejecución de las medidas, permaneciendo la totalidad del sistema inmóvil en todo momento.

Las salidas del circuito, temperatura del objeto y temperatura ambiente, se conectaron a diferentes canales analógicos de la tarjeta de adquisición de datos.

Para monitorizar los datos se lanzaba el programa de control realizado en *LabVIEW*, en el cual el tiempo de muestreo fue programado cada segundo, de forma que se dispone de un gran número de datos para comprobar el funcionamiento del sensor.

## 5.3 Verificación del sistema

En este apartado se muestran los datos de temperatura del objeto de medida recogidos por cada sensor, Temperatura-IR y CS LT, permaneciendo todo el sistema inmóvil, salvo la distancia de medida a la cual se encuentra el objeto y la temperatura ambiente que variarán para cada tipo de medida, permaneciendo ésta última constante durante el desarrollo de la misma. El tiempo de muestreo fue fijado a un segundo, por lo que se adquirieron una gran cantidad de datos.

Las medidas han sido realizadas utilizando tres fuentes de radiación de materiales diferentes: madera, aluminio y asfalto. Para cada medida realizada se ha seguido el mismo procedimiento anteriormente explicado, es decir, la exposición del material de medición ante ambos sensores cuando éste se encuentra a una temperatura de  $-25^{\circ}\text{C}$ , almacenando los datos de temperatura durante el aumento de la misma hasta alcanzar la temperatura ambiente a la que se encuentra el sistema. Para cada material se han realizado tres mediciones diferentes en las que varía ligeramente la temperatura ambiente y la distancia de medida entre 0.5, 1 y 1.7 metros, por lo que el área de visión máxima del dispositivo, para ésta última distancia de medida, se corresponde con una sección circular de 170mm de diámetro.

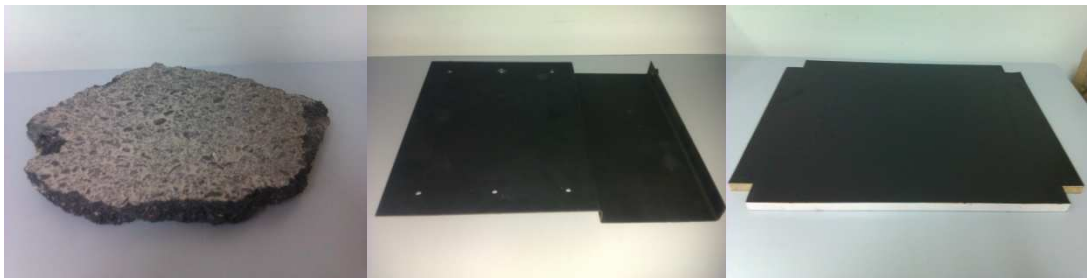


Figura 31. Fuentes de radiación empleadas: asfalto, aluminio y madera.

A continuación se detallan los datos de temperatura recogidos por cada sensor en función del tipo de material y la distancia de medida. En estos datos se ha representado la temperatura ambiente recogida por el termistor, ya que para todas las mediciones ésta sólo difiere  $0.3^{\circ}\text{C}$  con respecto a la medida por el sensor de referencia CS LT.

- **Asfalto**

En estas medidas se ha tomado como objeto de medida la muestra de asfalto empleada anteriormente para la calibración del sensor, la cual posee un área eficaz de  $240 \times 200 \text{ mm}^2$ , con 0.967 de emisividad.

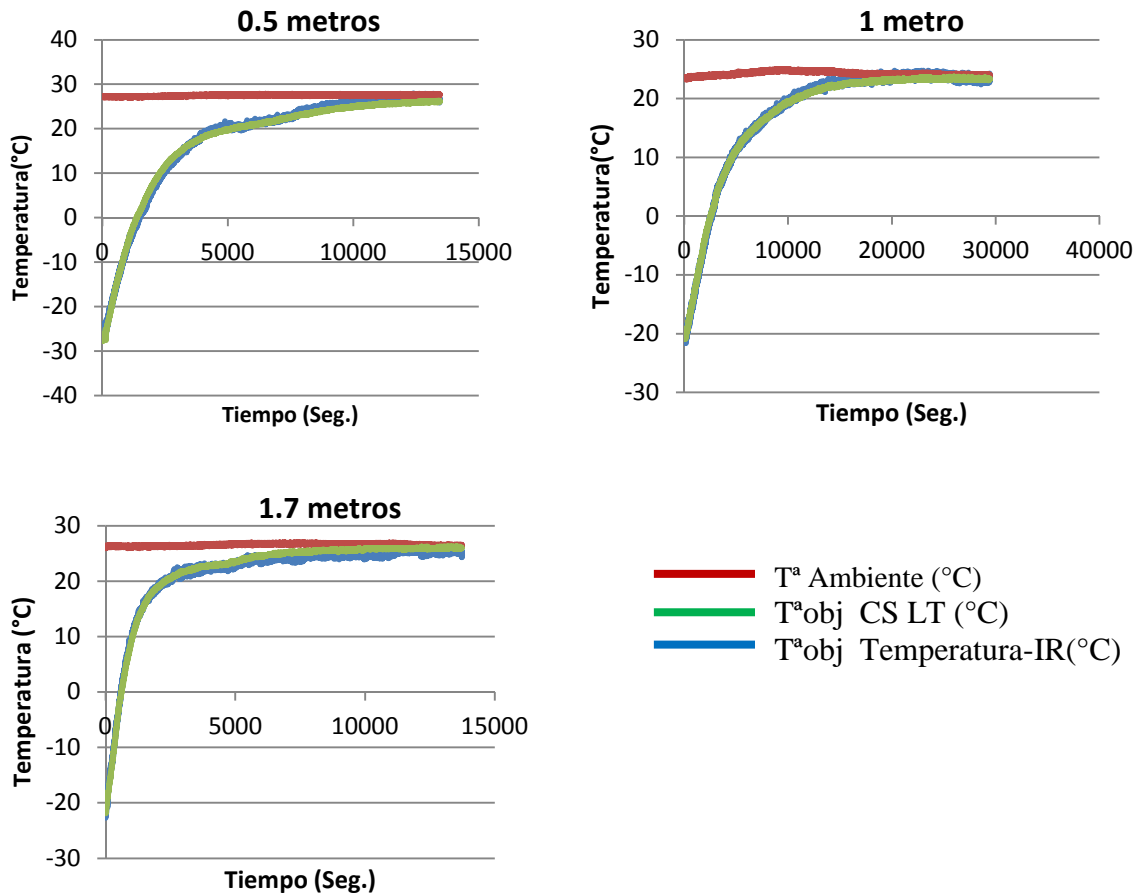


Figura 32. Temperatura-IR vs CS LT para asfalto.

La evolución de la temperatura del objeto durante el rango de trabajo para ambos sensores es prácticamente coincidente, con una desviación media entre ambos de  $0.6^\circ\text{C}$ .

De la gran cantidad de datos de temperatura almacenados se han extraído en intervalos de  $10^\circ\text{C}$  con el fin de poder ser analizados detalladamente. Debido a que el material permanece sometido a cada temperatura un tiempo superior al de muestreo (1 segundo), se han extraído varios valores de temperatura, tomando como referencia el sensor CS LT. Tras realizar un promediado con los mismos obtenemos el valor final de la temperatura del objeto recogida por el sensor diseñado, junto con su desviación. Esta desviación es calculada con respecto al dicho valor promediado, alcanzando un valor máximo de  $\pm 0.35^\circ\text{C}$  y un mínimo de  $\pm 0.02^\circ\text{C}$ , para cualquier valor de temperatura, distancia y material.

A continuación se muestran los datos de temperatura extraídos para diferentes distancias de medida, usando como material de medición el asfalto.

Distancia (m)	0.5	1	1.7
$T^a_{\text{Amb.}} (^\circ\text{C})$	27.70	24.26	26.55
$T^a_{\text{Obj. CS LT}} (^\circ\text{C})$	$T^a_{\text{Obj. Temp.-IR}} (^\circ\text{C})$	$T^a_{\text{Obj. Temp.-IR}} (^\circ\text{C})$	$T^a_{\text{Obj. Temp.-IR}} (^\circ\text{C})$
-20	-20.03	-20.29	-19.46
-10	-10.28	-9.62	-9.87
0	0.32	0.10	0.44
10	9.96	10.10	10.45
20	20.05	20.05	19.82

Tabla 10. Valores de Temperatura-IR vs CS LT para asfalto.



La diferencia máxima de temperatura existente entre ambos sensores es de  $0.38^{\circ}\text{C}$ , para una temperatura de  $-10^{\circ}\text{C}$  y una distancia de medida de 1 metro. Esta diferencia es máxima a bajas temperaturas, tendiendo a disminuir a medida que aumenta la temperatura alcanzando un valor mínimo de  $0.05^{\circ}\text{C}$ , para una temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  a 1 y 0.5 metros de distancia de medida.

- **Aluminio**

Para las siguientes mediciones se ha empleado una chapa metálica de aluminio, pintada en negro mate, tomándose como valor de emisividad 0.97 [OPT], correspondiente a dicha pintura, siendo su área de  $270 \times 320 \text{ mm}^2$ .

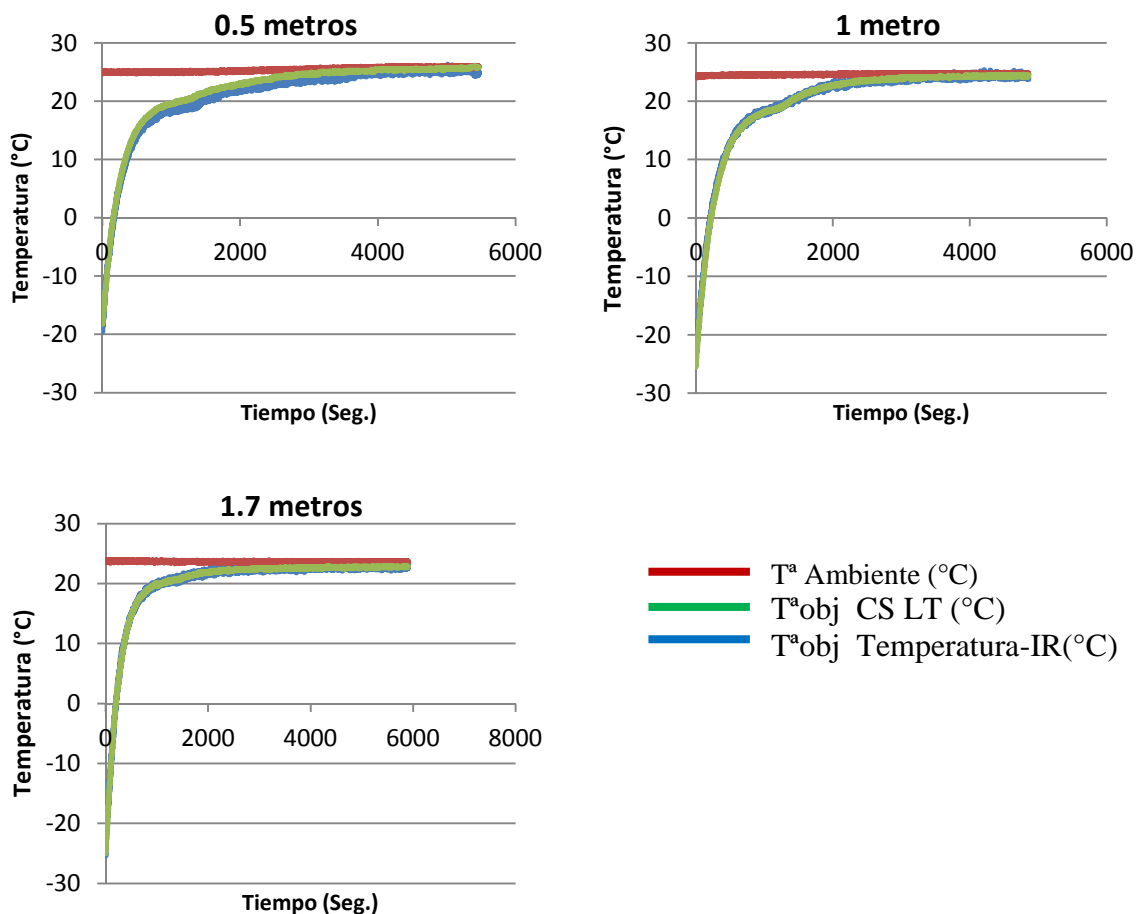


Figura 33. Temperatura-IR vs CS LT para aluminio.

Utilizando el aluminio como fuente de radiación infrarroja nos encontramos con una evolución similar para ambos sensores, presentando a una distancia de 0.5 metros cierta irregularidad en el intervalo de  $15$  a  $24^{\circ}\text{C}$ . Ésta es debida a la no perfecta coincidencia o alineación del área de visión de ambos sensores sobre la superficie de medida, obteniéndose una pequeña desigualdad o desviación entre ambos de  $0.7^{\circ}\text{C}$ , al no presentar el material un comportamiento homogéneo sobre el calentamiento de su superficie.

Distancia (m)	0.5	1	1.7
T <sup>a</sup> <sub>Amb.</sub> (°C)	25.4	24.61	24.46
T <sup>a</sup> <sub>Obj.</sub> CS LT (°C)	T <sup>a</sup> <sub>Obj.</sub> Temp.-IR (°C)	T <sup>a</sup> <sub>Obj.</sub> Temp.-IR (°C)	T <sup>a</sup> <sub>Obj.</sub> Temp.-IR (°C)
-20	-20.25	-19.32	-19.24
-10	-10.06	-9.6	-10.39
0	-0.35	0.32	-0.25
10	9.57	10.03	9.9
20	19.35	19.94	20.6

Tabla 11. Valores de Temperatura-IR vs CS LT para aluminio.

La desviación máxima de temperatura generada entre ambos sensores, tomando como material el aluminio, se produce a -20°C de temperatura para una distancia máxima de 1.7 metros, con un valor de 0.76°C, encontrándose por debajo de la precisión mínima de 1.1°C deducida en la calibración del sensor.

El resto de medidas presentan una precisión superior a 0.76°C, aumentando progresivamente a medida que aumenta la temperatura.

- **Madera**

Las últimas medidas se han realizado con una pieza de madera, también pintada en color negro mate, por lo que consideramos la misma emisividad que para el aluminio, es decir, una emisividad de 0.7. Su área es superior a las utilizadas anteriormente, con un valor de 600x500mm<sup>2</sup>.

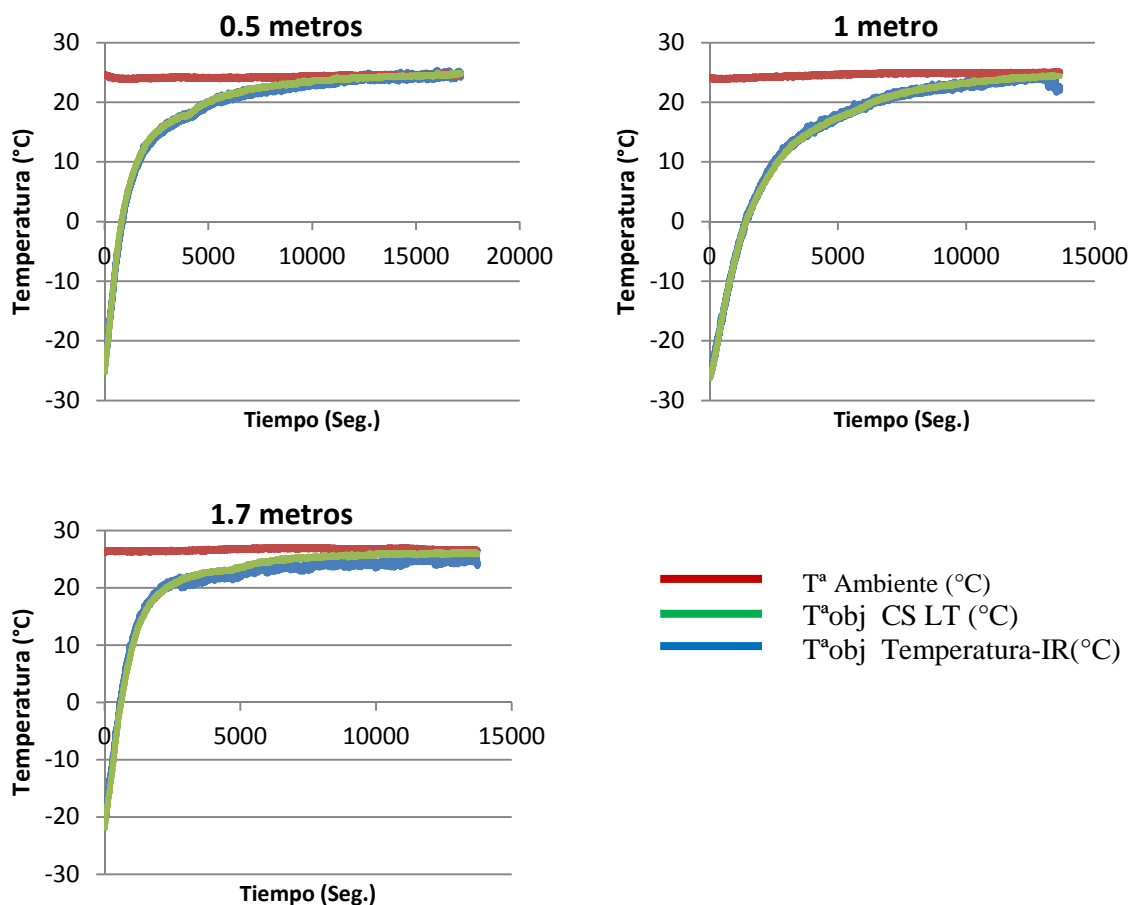


Figura 34. Temperatura-IR vs CS LT para madera.

Las mediciones de temperaturas recogidas por ambos sensores sobre madera, muestran una evolución coincidente en todo el rango de medida para las diferentes distancias, presentando una diferencia media de  $0.4^{\circ}\text{C}$  entre las respuestas de ambos sensores.

Cabe destacar una pequeña desigualdad de calentamiento del material a una distancia de 1.7 metros, presentando una desviación entre sendos sensores en torno a  $1^{\circ}\text{C}$ , no teniendo en cuenta ésta, al producirse por encima de  $20^{\circ}\text{C}$ , es decir, fuera de nuestro rango de medición.

Distancia (m)	0.5	1	1.7
$T^{\text{a}}_{\text{Amb.}} (^{\circ}\text{C})$	24.32	24.65	26.65
$T^{\text{a}}_{\text{Obj. CS LT}} (^{\circ}\text{C})$	$T^{\text{a}}_{\text{Obj. Temp.-IR}} (^{\circ}\text{C})$	$T^{\text{a}}_{\text{Obj. Temp.-IR}} (^{\circ}\text{C})$	$T^{\text{a}}_{\text{Obj. Temp.-IR}} (^{\circ}\text{C})$
-20	-20.13	-20.09	-19.54
-10	-10.34	-10.18	-9.46
0	0.32	0.27	0.73
10	10.07	10.21	10.13
20	19.87	20.01	20.25

Tabla 12. Valores de Temperatura-IR vs CS LT para madera.

Con este material, obtenemos una precisión mínima de  $0.54^{\circ}\text{C}$  para una temperatura de  $-10^{\circ}\text{C}$  y 1.7 metros de distancia de medida, aumentando esta precisión hasta valores de  $0.01^{\circ}\text{C}$  para temperaturas superiores.

## 5.4 Conclusiones

Con las medidas realizadas en este capítulo, se verifica un correcto funcionamiento del sensor diseñado para las distintas fuentes de radiación empleadas, tomándose como referencia un sensor basado en los mismos principios de funcionamiento, sensor CS LT.

Se han tomado diferentes mediciones con ambos sensores expuestos ante tres materiales diferentes, asfalto, aluminio y madera, variando la distancia de medida entre 0.5 y 1.7 metros, obteniendo de esta forma la evolución de temperaturas en función de la distancia para nuestro intervalo de trabajo, comprendido entre  $-20$  y  $20^{\circ}\text{C}$ , cuyo tiempo de muestreo ha sido programado cada segundo, obteniendo una gran cantidad de datos.

Dada la gran cantidad de datos, han sido extraídos éstos en intervalos de  $10^{\circ}\text{C}$  para cada material y distancia medida, con el fin de poder ser analizados con un mayor detalle, obteniendo una precisión mínima de nuestro dispositivo de  $0.8^{\circ}\text{C}$  para una temperatura límite de  $-20^{\circ}\text{C}$ . La precisión mínima ha sido obtenida para los tres materiales, a bajas temperaturas, sin sobrepasar la precisión mínima de  $1.1^{\circ}\text{C}$  para una temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$ , obtenida con la calibración del sensor.

Con la finalización de este capítulo queda terminado el desarrollo del sensor de temperatura remoto, habiendo sido verificado el funcionamiento del mismo con respecto al sensor tomado como referencia, cumpliendo con los requisitos establecidos y presentado una precisión mínima de  $1.1^{\circ}\text{C}$  para una temperatura límite de  $-20^{\circ}\text{C}$ , aumentando significativamente este valor de precisión a medida que disminuye la diferencia entre la temperatura del objeto y temperatura ambiente, ya que para una temperatura de  $-15^{\circ}\text{C}$  esta precisión pasa a tomar un valor de  $0.58^{\circ}\text{C}$ .

A continuación se muestra la hoja de características técnicas que reúne el sensor diseñado:

## Temperatura-IR

### TERMÓMETRO INFRARROJO



Especificaciones de medición	
Rango de temperatura	-20 a 20°C
Rango espectral	8 a 12μm
Resolución óptica D:S	10:1
Precisión mínima (A temperatura ambiente de 25 ± 5°C )	1.1°C a -20°C
Repetitividad (A temperatura ambiente de 25 ± 5°C )	0.5°C
Resolución	0.3°C
Tiempo de respuesta	0.2 segundos
Emisividad ajustable por software	0.1 a 1

Especificaciones generales	
Temperatura ambiente	-20 a 30°C
Temperatura de medición	-20 a 20°C
Peso	35g
Dimensiones	Ø=30.5mm L= 54.6mm

Especificaciones eléctricas	
Alimentación (Cable Rojo)	5.3 a 16V DC
Consumo de corriente	3.3mA
Longitud de cables	1.5m
Salida analógica	
V <sub>termopila</sub> (Cable blanco)	1 a 3V
V <sub>termistor</sub> (Cable amarillo)	4 a 1V

Temperatura ambiente (°C)	$T_{amb} = \left[ \frac{1}{\beta} \cdot \ln \left( \frac{\left( \frac{270 \cdot 10^3}{5} \right)}{V_{termistor(V)}^{-1}} + \frac{1}{T_0(K)} \right) \right]^{-1} - 273.15 \quad [16]$ <p><math>\beta=3940K, R_0=100k\Omega @ 25^\circ C</math></p>
Temperatura del objeto (°C)	$T_{obj} = \left[ \sqrt[4]{\frac{V_{termopila(V)} - 2.0356}{1001 \cdot K \cdot \varepsilon}} + T_{amb}^4(K) \right] - 273.15 \quad [17]$ <p><math>K=1,57 \times 10^{-13} V/K^4</math></p>

Tabla 13. Hoja de características técnicas del sensor Temperatura-IR diseñado.

# Capítulo 6

## Conclusiones

El objetivo de partida del proyecto era el desarrollo de un termómetro de temperatura remoto. Objetivo que se ha logrado, gracias al estudio de los principios de radiación de los materiales en el infrarrojo próximo, a la elección de la termopila adecuada capaz de satisfacer nuestras necesidades, así como todo el desarrollo electrónico, óptico y mecánico que conlleva el sensor, junto con su calibración y verificación de funcionamiento. También cabe destacar, la utilización de un segundo sensor, tomado como referencia para llevar a cabo la calibración y comprobación del funcionamiento, al poseer características similares y estar basado en el mismo principio de funcionamiento.

En primer lugar, en el capítulo 2 se ha realizado un estudio sobre los principios básicos de termometría infrarroja. Aquí se estudiaron diferentes fundamentos físicos sobre la cuantificación de la radiación infrarroja emitida por los cuerpos y las diferentes formas de captación de la misma, centrándonos en la termopila. Ésta suministra una tensión proporcional a la temperatura que se encuentra el objeto de medida, por medio de la radiación que emite el mismo en función de su temperatura. Esta radiación se ve afectada por la reflexión de la temperatura ambiente sobre el objeto, por lo que en el interior del encapsulado de la termopila se encuentra un termistor encargado de compensar dicha temperatura ambiente.

Conocido los principios básicos de captación y cuantificación de la energía radiada por los cuerpos a través de una termopila, se realiza una búsqueda global clasificando los principales proveedores de termopilas existentes actualmente en el mercado, atendiendo a las principales características de las mismas. Tras esta clasificación se adquieren dos tipos

de termopilas, una con salida analógica y otra digital, llevando a cabo el desarrollo de nuestro termómetro con la termopila de salida analógica.

A continuación, se ha llevado a cabo todo un diseño electrónico dividido en dos circuitos de acondicionamiento, termopila y termistor, implementados con el software de diseño de circuitos electrónicos *OrCAD*. Finalizado el diseño, se ha realizado el calibrado de ambos circuitos con la ayuda de un sensor de referencia basado en los mismos principios de funcionamiento. Además se le dota al dispositivo de un sistema óptico con el fin de disminuir su abertura de visión y aumentar el alcance del mismo.

Finalmente, se han diseñado los experimentos utilizando la instrumentación disponible en el laboratorio, destacando el uso de una cámara climática, una tarjeta de adquisición de datos y el entorno gráfico de programación *LabVIEW*. Las pruebas descritas en el capítulo anterior se han realizado siguiendo un protocolo que nos permite asegurar el correcto funcionamiento de los sistemas electrónicos, la adecuada fijación y alineación de ambos sensores con respecto al objeto de medida, y el correcto procesamiento de las señales adquiridas. Por tanto, a la vista de los resultados obtenidos, se puede verificar un comportamiento correcto del dispositivo diseñado, permitiéndonos la adquisición de la temperatura de un objeto de manera remota, para un rango de temperaturas comprendido entre  $-20$  y  $20^{\circ}\text{C}$ , conocida la emisividad del mismo.

En la realización de este proyecto fin de carrera se han utilizado y ampliado los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, en especial las asignaturas optoelectrónica, instrumentación y electrónica analógica.

# Capítulo 7

## Gestión y presupuesto del proyecto

### 7.1 Gestión

Este proyecto ha sido realizado a lo largo de los meses comprendidos entre Diciembre de 2011 y Octubre de 2012, ambos inclusive. Éste se puede dividir en las etapas mostradas a continuación.

Tareas	Comienzo (día/mes/año)	Duración (días)	Fin (día/mes/año)
Estudio teórico	<b>lun 05/12/11</b>	15 días	mié 11/01/12
Búsqueda y clasificación de termopilas	lun 12/12/11	33 días	mié 08/02/12
Compra de termopila	jue 09/02/12	15 días	mié 29/02/12
Diseño electrónico	jue 12/01/12	13 días	lun 30/01/12
Prueba en protoboard con termopila auxiliar	jue 02/02/12	20 días	mié 29/02/12
Diseño optomecánico	jue 01/03/12	5 días	mié 07/03/12
Diseño de PCB en OrCAD	jue 08/03/12	15 días	mié 28/03/12
Fabricación de PCB	jue 29/03/12	12 días	lun 23/04/12
Compra de componentes, lente y material optomecánico	jue 29/03/12	12 días	lun 23/04/12
Prueba en protoboard con termopila auxiliar	jue 29/03/12	12 días	lun 23/04/12
Soldadura de PCB	mar 24/04/12	5 días	jue 03/05/12
Calibración del sistema	vie 04/05/12	30 días	jue 14/06/12

Desarrollo de software de control	vie 15/06/12	12 días	lun 02/07/12
Puesta en funcionamiento	mié 04/07/12	25 días	vie 07/09/12
Verificación del sistema con termómetro auxiliar	lun 10/09/12	23 días	<b>mié 10/10/12</b>

Tabla 14. Descripción y periodo de las tareas realizadas en el proyecto.

A continuación se presenta el diagrama de Gantt correspondiente a las anteriores tareas.

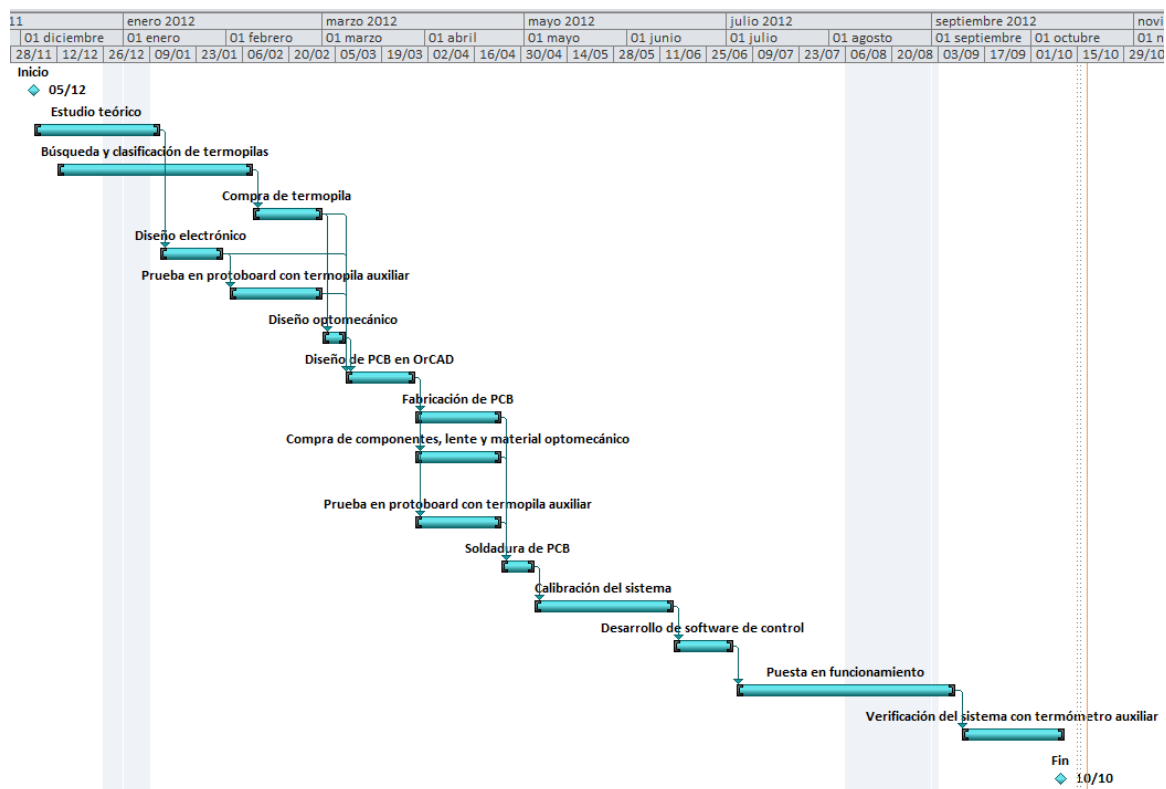


Figura 35. Diagrama de Gantt.

En el diagrama de Gantt se contemplan las actividades previas realizadas con la beca de colaboración con el Departamento de Tecnología Electrónica, necesarias para la comprensión y desarrollo de este trabajo.

## 7.2 Presupuesto

**Autor:** Abraham de los Ángeles Díaz García

**Departamento:** Tecnología Electrónica

**Descripción del Proyecto:**

Título: Desarrollo de un sensor de temperatura remoto basado en la radiación infrarroja.

Duración del proyecto: 10 meses

Tasa de costes indirectos: 20%

**Presupuesto total del Proyecto:** 18190 €



**Desglose presupuestario (costes directos):**

<b>Coste de personal</b>				
<b>Apellidos, Nombre</b>	<b>Categoría</b>	<b>Dedicación (hombres mes) *</b>	<b>Coste hombre mes (€)</b>	<b>Importe total (€)</b>
Ruiz LLata, Marta	Ingeniero Senior	0.8	4289.54	3431.63
Díaz García, Abraham	Ingeniero	3.9	2694.39	10508.12
<b>Hombres mes 4.7</b>		<b>Coste total del personal</b>		<b>13939.75 €</b>

\* 1 Hombre mes = 131.25 horas. Máximo anual de dedicación de 12 hombres mes (1575 horas).  
Máximo anual para PDI de la Universidad Carlos III de Madrid de 8.8 hombres mes (1155 horas).

<b>Coste de equipos</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Coste (€)</b>	<b>% Uso dedicado al proyecto</b>	<b>Dedicación (meses)</b>	<b>Periodo de Depreciación (meses)</b>	<b>Importe total (€)</b>
Cámara climática	12500	60	5	60	625
Ordenador de desarrollo	1000	100	10	60	166.67
Sensor CS LT	186.25	100	10	30	62.08
Otros	150	80	10	60	25
<b>Coste total de equipos</b>					<b>878.75 €</b>

<b>Coste de subcontratación de tareas</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Empresa</b>	<b>Importe total (€)</b>
Fabricación de placa PCB	Oficina Técnica, UC3M	70
<b>Coste total de subcontratación de tareas</b>		<b>70 €</b>

<b>Coste de material</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Empresa</b>	<b>Importe total (€)</b>
Termopila	HeimannSensor	11.50
Componentes electrónicos	Farnell	14.34
Componentes optomecánicos	Thorlabs	48.32
Lente	Thorlabs	195.75
<b>Coste total de material</b>		<b>269.91 €</b>

### Resumen del presupuesto

<b>Presupuesto costes totales</b>	<b>Importe total (€)</b>
Personal	13940
Amortización	879
Subcontratación de tareas	70
Material	270
Costes indirectos (20%)	3032
<b>Total presupuesto</b>	<b>18190 €</b>

“El presupuesto total de este proyecto asciende a la cantidad de DIECIOCHO MIL CIENTO NOVENTA EUROS.

Leganés a 24 de Octubre de 2012

El ingeniero proyectista

Fdo. Abraham de los Ángeles Díaz García

# Referencias

- [OPT] Optris. Disponible [Internet]: < <http://www.optris.com/downloads-compact-series> > [25 de October de 2012]
- [VA98] Valea Pérez, Ángel y Alonso Girón, Jesús Maria. Radiación infrarroja y ultravioleta: tecnología y aplicaciones. Mc Graw Hill, 1998.
- [MEMS] Memstech. Disponible [Internet]: <<http://www.memstech.com/file/MBL-RevA.pdf>> [25 de October de 2012]
- [THLE] Thorlabs. Lentes. Disponible [Internet]: <<http://www.thorlabs.com/catalogpages/V21/674.pdf>> [25 de October de 2012]
- [RLTL] Roithner Laser Technik. Lentes. Disponible [Internet]: <<http://www.roithner-laser.com/lenses.html>> [25 de October de 2012]
- [HETE] HeimannSensor. Termopilas. Disponible [Internet]: <[http://www.heimannsensor.com/products\\_singles.php](http://www.heimannsensor.com/products_singles.php)> [25 de October de 2012]
- [EXTE] Excelitas. Termopilas. Disponible [Internet]: <<http://www.excelitas.com/Pages/Product/Thermopile-Detectors-Sensors-and-Array-Modules.aspx>> [25 de October de 2012]
- [DETE] Dexter. Termopilas. Disponible [Internet]: <<http://www.dexterresearch.com/?module=Page&sID=st60-with-diffractive-lens>> [25 de October de 2012]
- [NITE] Nicera. Termopilas. Disponible [Internet]: <<http://www.nicera-european.co.uk/product4b.htm>> [25 de October de 2012]
- [MMST] MMS-electronics Termopilas. Disponible [Internet]: <<http://www.mmselectronics.co.uk/smt9901.htm>> [25 de October de 2012]
- [EOCT] EOC. Termopilas. Disponible [Internet]: <[http://www.eoc-inc.com/thermopile\\_detectors.htm](http://www.eoc-inc.com/thermopile_detectors.htm)> [25 de October de 2012]

[DEXT] Dexter. Termopilas. Disponible [Internet]: <<http://www.dexterresearch.com/?module=Page&sID=st60-with-diffractive-lens>> [25 de October de 2012]

[MESP] Measurement Specialties. Disponible [Internet]: <<http://www.meas-spec.com/temperature-sensors/thermopile-infrared-sensors-modules/thermopile-infrared-ir-sensors.aspx>> [25 de oktober de 2012]

[PATE] Pacer. Termopilas. Disponible [Internet]: <<http://www.pacer.co.uk/products/sensors/thermoandpyro/thermometry/>> [25 de October de 2012]

[LACO] Laser Components. Termopilas. Disponible [Internet]: <[http://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user\\_upload/home/Datasheets/drc/singleelements.pdf&no\\_cache=1](http://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user_upload/home/Datasheets/drc/singleelements.pdf&no_cache=1)> [25 de October de 2012]

[GESR] GE Measurement & Control. ZTP-135SR. Disponible [Internet]: <<http://www.ge-mcs.com/en/temperature/infrared-ir-sensors/ztp-135sr.html>> [25 de October de 2012]

[AD86] Analog Device. AD8628. Disponible [Internet]: <[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8628\\_8629\\_8630.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8628_8629_8630.pdf)> [25 de October de 2012]

[DCLP] Datasheet Catalog. LP2980IM5-5. Disponible [Internet]: <[http://www.datasheetcatalog.com/datasheets\\_pdf/L/P/2/9/LP2980.shtml](http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/L/P/2/9/LP2980.shtml)> [25 de October de 2012]

[OPCS] Optris. CS LT. Disponible [Internet]: <<http://www.optris.com/optris-cs>> [25 de October de 2012]

[THLA] Thorlabs. Lente LA9509-F. Disponible [Internet]: <<http://www.thorlabs.de/thorProduct.cfm?partNumber=LA9509-F>> [25 de October de 2012]

[TH1L] Thorlabs. Tubo SM1L20. Disponible [Internet]: <<http://www.thorlabs.de/thorProduct.cfm?partNumber=SM1L20>> [25 de October de 2012]

[TH1R] Thorlabs. Tuerca SM1RR. Disponible [Internet]: <<http://www.thorlabs.de/thorProduct.cfm?partNumber=SM1RR>> [25 de October de 2012]

[CAOR] Cadence. OrCAD. Disponible [Internet]: <<http://www.cadence.com/products/orcad/pages/default.aspx>> [25 de October de 2012]

[DYCO] Dycometal. Disponible [Internet]: <<http://www.dycometal.com>> [25 de October de 2012]

[EUR] Eurotherm. Disponible [Internet]: <[http://www.entech.se/d/datablad/Eurotherm\\_2604.pdf](http://www.entech.se/d/datablad/Eurotherm_2604.pdf)> [25 de October de 2012]

[NAIN] National Instruments. Disponible [Internet]: < <http://www.ni.com> > [25 de October de 2012]

[MICP] Microchip. PIC18f2525. Disponible [Internet]: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39626b.pdf>> [25 de October de 2012]

[MICM] Microchip. MPLab. Disponible [Internet]: < <http://www.microchip.com/mplab> > [25 de October de 2012]

[MICC] Microchip. Compilador C18. Disponible [Internet]: <<http://www.microchip.com/c18>> [25 de October de 2012]

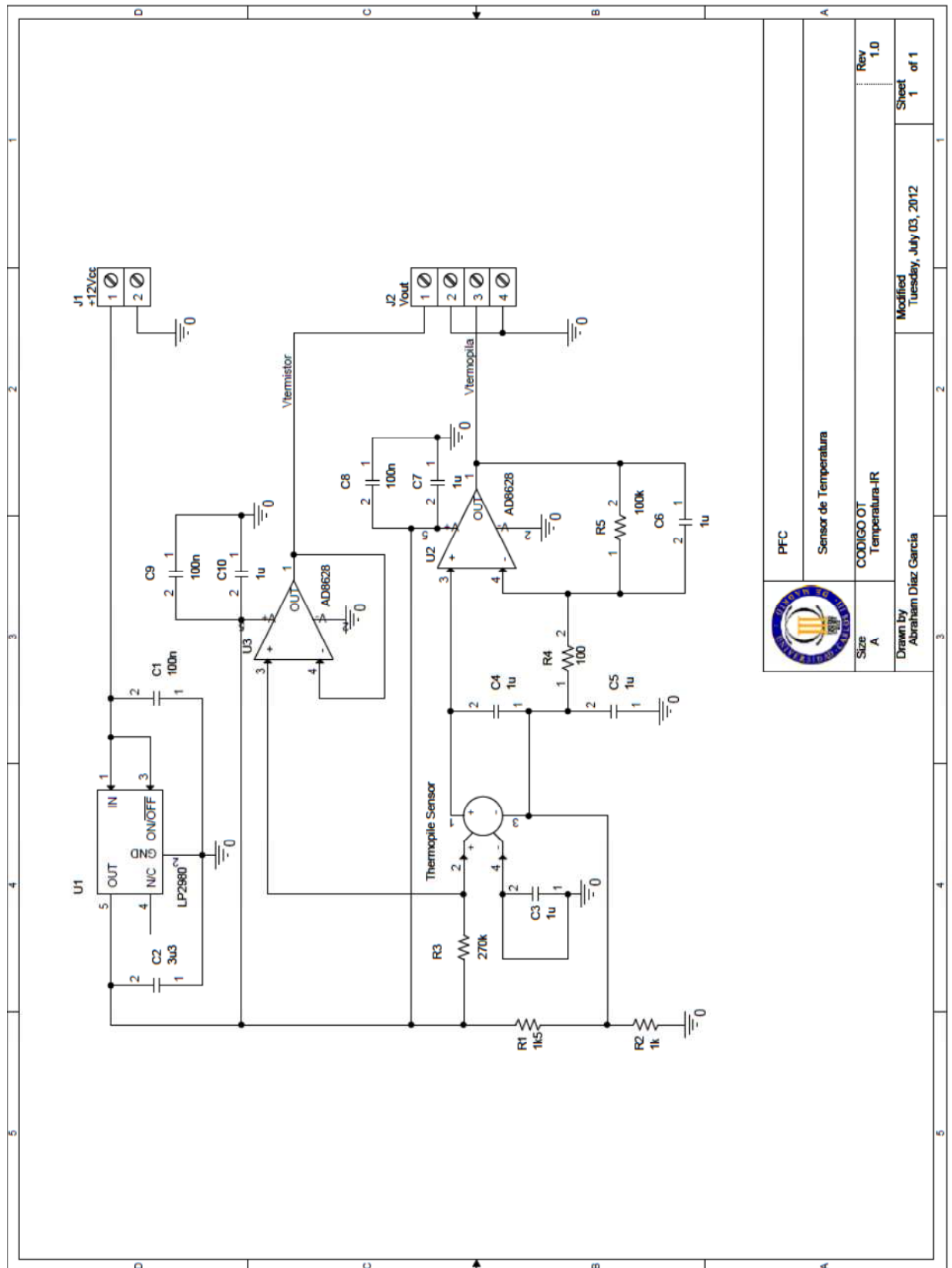
[DCMA] DatasheetCatalog. MAX232. Disponible [Internet]: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/max232.pdf>> [25 de October de 2012]



# **Anexo 1**

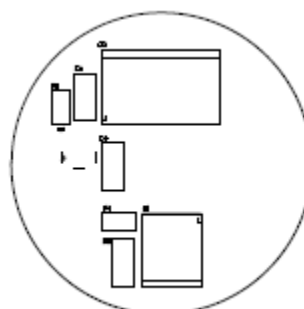
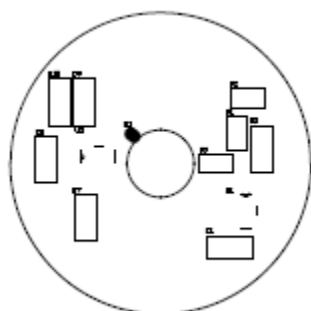
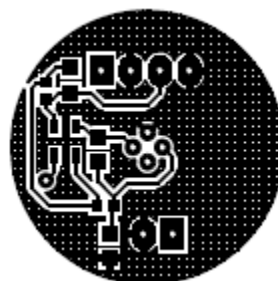
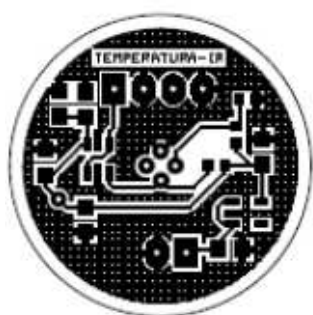
## **Documentación de placa Temperatura-IR**

## ESQUEMÁTICO





## LAYOUT





## **Anexo 2**

### **Puesta en marcha de termopila con salida digital**

## PUESTA EN MARCHA DE TERMOPILA CON SALIDA DIGITAL

La termopila con salida digital modelo HDI L14 FL5.5 T100 del fabricante *HeimannSensor* [HETE], fue adquirida y acondicionada para ver su funcionamiento. Este modelo incorpora una lente de 5mm de distancia focal, con relación D:S 8:1, lo cual permite medir objetos a grandes distancias, ya que su ángulo de abertura es mínimo. Su resolución es inferior a 1°C y con una temperatura máxima de 100°C.

Para obtener la temperatura del objeto debemos de leer la dirección correspondiente a la memoria RAM interna en la termopila. La comunicación con el sensor se debe realizar con el protocolo especificado por el fabricante, protocolo SMBus. Es un protocolo muy sencillo, basado en la comunicación Maestro-Esclavo.

Para establecer este protocolo de comunicación con el sensor nos hemos decantado por la utilización de un PIC, concretamente el modelo PIC18f2525, de *Microchip* [MICP]. La elección de este microcontrolador se debe a la facilidad que ofrece de programación y comunicación a través de un ordenador, así como su reducido tamaño.

A continuación se muestra el circuito desarrollado para la comunicación y alimentación del sensor y del PIC, siendo ésta de 5 V.

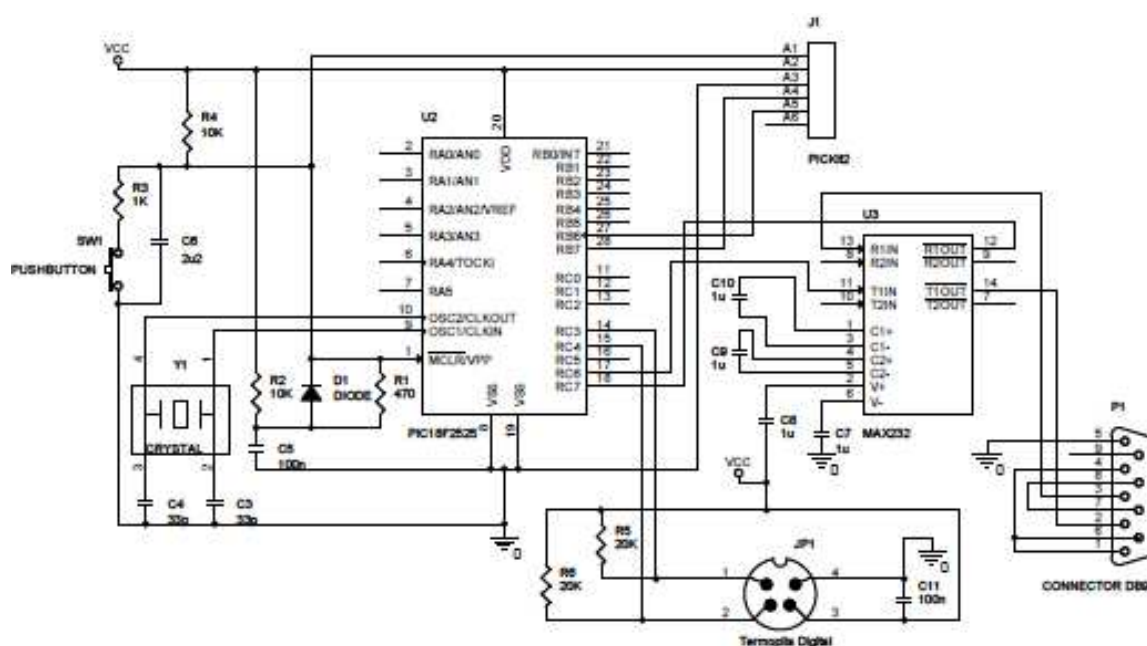


Figura 36. Circuito de comunicación y alimentación de la termopila digital.

La comunicación entre el PIC y el ordenador se realizó a través del puerto serie RS-232, por medio del circuito integrado MAX232 [DCMA] que convierte los niveles de las líneas del puerto serie a niveles TTL y viceversa.

La programación del protocolo SMBus se realizó en lenguaje C, a través del programa que nos facilita *Microchip*, llamado *MPLab* [MICM]. Junto al programa fue instalado el compilador de C correspondiente, C18 [MICC]. Este lenguaje ofrece amplia variedad de funciones que permiten facilitar toda la programación.

Desarrollado hardware y software del dispositivo se comprobó su funcionamiento obteniendo la temperatura de varios objetos y mostrándolas por pantalla a través del HyperTerminal del ordenador.